

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de
Minas

Nilce Alves dos Santos

MODELAMENTO DE FLOTAÇÃO POR CLASSES DE TAMANHO E
LIBERAÇÃO

Belo Horizonte
2018

Nilce Alves dos Santos

**MODELAMENTO DE FLOTAÇÃO POR CLASSES DE TAMANHO E
LIBERAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas
da Universidade Federal de Minas
Gerais como requisito parcial à
obtenção do título de Doutora em
Engenharia Metalúrgica, Materiais
e de Minas

Orientador: Prof. Roberto Galery

Belo Horizonte
2018

S237m

Santos, Nilce Alves dos.

Modelamento de flotação por classes de tamanho e liberação [recurso eletrônico] / Nilce Alves dos Santos. – 2018.
1 recurso online (413 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Roberto Galéry.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 222-413.

Bibliografia: f. 216-221.

1. Engenharia de minas – Teses. 2. Tecnologia mineral – Teses.
3. Modelagem matemática – Teses. 4. Flotação – Teses. I. Galéry,
Roberto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
III. Título.

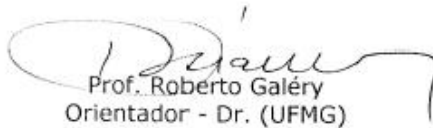
CDU: 622(043)

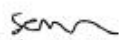


UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas

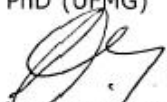


Tese intitulada "**Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação**", área de concentração: Tecnologia Mineral, apresentada pela candidata **Nilce Alves dos Santos**, para obtenção do grau de Doutora em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, aprovada pela comissão examinadora constituída pelos seguintes membros:

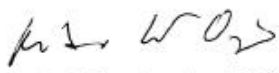

Prof. Roberto Galéry
Orientador - Dr. (UFMG)


Prof. Luiz Cláudio Monteiro Montenegro
Dr. (UFMG)


Prof. Antônio Eduardo Clark Peres
PhD (UFMG)


Prof. Cláudio Luiz Schneider
PhD (CETEM)


Prof. Arthur Pinto Chaves
Dr. (USP)


Prof. Rodrigo Lambert Oréfice
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas/UFMG

Belo Horizonte, 26 de fevereiro de 2018

A minha mainha ***Cecília***,
a meu pai, ***Hamilton***
a minha avó, “***Manzinha***” ***Eutália***,
e a meus irmãos ***Denise e Antônio Hamilton***
com amor sem fim

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, por tudo e em tudo, a Deus, Pai de infinita bondade, criador da vida, da natureza e de seus mistérios, por toda bênção e toda luz que abundantemente derramou sobre meu caminho; pela minha família incrível, por meus amigos do coração e por tantas pessoas que estiveram e estão ao meu lado.

Trago em mim uma gratidão infinita:

- ≈ A minha mainha, Cecília, por ser esta mulher de fé, de decisão, garra, alegria e paz, generosidade e ação em todo o tempo, pelo imenso amor, carinho e zelo, por ser abrigo que acolhe e arco que lança, por ser este anjo em oração. A sua fé me sustenta, a sua alegria me renova, a sua decisão de manter a chama sempre acesa me ilumina. Mais uma vez seu apoio sereno produziu frutos.
- ≈ A meu pai, Hamilton, este grande homem que sempre estará presente, pelo exemplo de justiça, integridade, bondade, alegria e simplicidade, por todo imenso carinho, humor e amor, por haver me ensinado a gostar de ler e de buscar o conhecimento, a apreciar a profundidade em tudo, a encantar-me sempre com a beleza em saber.
- ≈ A minha avó, minha “Manzinha” Eutália, que sempre estará presente, exemplo de imensa garra e determinação, por todo o cuidado, zelo, amparo, força, carinho e presença constantes, por seu coração de aço, ouro e plumas, e por ser a primeira mestra que, entre tantas coisas e valores, ensinou-me, desde criança, o valor e a importância do estudo constante e do trabalho bem feito.
- ≈ Aos meus irmãos queridos, Denise e Antônio por tanto me alegrarem - cada um de seu jeito único e especial – pelos momentos de partilha, pelo incentivo, pela motivação, por serem companheiros de toda hora, para o que der e vier. Vocês são a definição de fraternidade, meus irmãos.

Agradeço muito a Orivaldo Savassi, mentor do modelo dos compartimentos, por, ainda no tempo do mestrado, ter me transferido *todo* o conhecimento e lógica de seus modelos com imensa paciência e total confiança, como somente um bom mestre e amigo faz. Foi

esta sua crença em mim, daquele tempo, que me fez seguir para o doutorado. De perto ou de longe, eu *sempre* o terei como meu amigo, a quem agradeço de coração.

A Vania Lúcia de Lima Andrade, com quem aprendi muito sobre flotação, por iniciar-me nesta área, com cuidado e leveza, e pela presença e amizade constantes. Os anos passam, as circunstâncias mudam, mas é muito bom que sua amizade e presença permaneçam.

A Paulo Roberto Soutto Mayor Nogueira e Maria Cristina Almeida Valadares, pelo incentivo ao meu desenvolvimento, pela confiança em meu potencial, por haverem provido apoio e suporte e pela amizade. Através deles, agradeço também ao Centro de Desenvolvimento Mineral da Vale.

A Alcides Fontana, Kleber Menezes, Kelly Oliveira, Roberto Rezende, Airton Fonseca, José Maria Silva por todo suporte, zelo, companheirismo, atenção e profissionalismo na condução e execução dos ensaios.

A Rogério Kwitko, por ter conduzido os estudos mineralógicos por QEMScan deste projeto com toda a atenção, disponibilizando-se a encontrar um tempo para realizá-los quando tantos outros projetos demandavam atenção simultânea.

A Gislayne Luz e equipe do laboratório químico que conduziram as análises químicas, sempre com cuidado e rapidamente.

A Reginaldo Liberato, Fábio Duarte e Thiago Valle, pela amizade e apoio nos últimos anos, bem como por compartilhar comigo os aspectos práticos e de desenvolvimento de novos equipamentos para a flotação industrial.

Ao Professor Roberto Galery, pelo apoio junto à UFMG, pela total liberdade e autonomia concedidas a mim neste estudo e por sua gentileza e bom humor.

A todos os que estiveram envolvidos neste trabalho, direta ou indiretamente, e favoreceram sua execução e conclusão.

A todos os meus amigos que ao longo desta jornada estiveram ao meu lado, de perto ou de longe, apenas na lembrança ou no contato diário, acreditando ou nem tanto, mas sempre apoiando, incentivando, torcendo e desejando bem e sucesso como só os bons amigos sabem fazer.

A todos vocês,

Muito obrigada!

RESUMO

Granulometria e liberação são características do minério que tem grande impacto no desempenho da flotação. Os efeitos destes dois fatores têm sido discutidos e estudados desde os primeiros anos de desenvolvimento do processo. Entretanto, ainda é necessário consolidar como a liberação e o tamanho de partícula, em conjunto, afetam o desempenho da flotação, utilizando um minério real em um circuito contínuo, sob condições convencionais e após a correção dos dados de liberação. Neste estudo, o comportamento das classes de liberação foi avaliado usando um minério calcopirítico flotado em um circuito contínuo, em mini planta piloto, com condições equivalentes às de uma flotação industrial em termos de tamanho de partícula, percentagem de sólidos e mineralogia de alimentação. Para minimizar a propagação dos erros nos resultados de liberação, o método de reconciliação de Savassi foi utilizado e otimizado. Esta abordagem possibilitou um balanço de massas hierárquico juntamente com a correção mineralógica, o que fez com que os dados de liberação se tornassem consistentes com os dados de processo, gerando um balanço representativo em todos os níveis. O comportamento das classes de liberação de acordo com a altura de espuma foi avaliado para a primeira célula rougher. Quanto maior a altura de espuma na etapa rougher 1, maior foi o teor do concentrado e menor a recuperação. Esta maior seletividade ocorreu por uma rejeição progressiva de ganga livre e partículas mistas de baixo teor. A recuperação na espuma se mostrou bastante dependente da liberação e da área superficial mineralizada nas partículas. Dois novos modelos matemáticos foram propostos para representar a recuperação por classes de tamanho e liberação. O primeiro corresponde a uma equação matemática empírica que representa a recuperação por classes em cada fração granulométrica. O segundo modela o efeito da liberação na flotação a partir da área mineral superficial. Estes modelos podem ser uma base para avaliar a efetividade de moagem e flotação e também podem ser incluídos em estratégias mina-usina.

Palavras-chave: modelamento de flotação; flotação por classes de liberação; flotação por fração de tamanho; flotação de cobre; recuperação na espuma; balanço de massas por classe de liberação

ABSTRACT

Particle size and liberation are the ore characteristics that have the largest impact on flotation performance. The effects of these two factors have been extensively discussed and studied since the early years of flotation. However, it is still necessary to consolidate how liberation and size, in conjunction, affect flotation performance, using a real ore in a continuous circuit, under regular conditions and after correction of liberation data. In this work, the behaviour of size liberation classes was evaluated using a chalcopyrite ore floated in a continuous mini pilot plant circuit, with conditions equivalent to the industrial flotation in terms of particle size, solids percentage and feed mineralogy. To minimize error propagation in the liberation results, Savassi reconciliation method was used and optimized. This approach performs mineralogical correction while generates a hierarchical mass balance. Resulting liberation data became consistent with process data, providing a representative mass balance. The behaviour of size liberation classes according to the froth height was evaluated for the first rougher cell. The higher the froth, the higher the concentrate grade and the lower the recovery. This higher selectivity happened due to a progressive rejection of free gangue and low grade composite particles. Froth recovery was dependent on liberation and particle size. Two models were developed to describe the flotation of liberation classes: The first was an empirical mathematical model that represents flotation recovery of liberation classes in each particle size fraction. The second details and models the effect of liberation on flotation considering the mineral surface area. These models can be the basis for evaluating the effectiveness of grinding and flotation, and can also be included in mine-to-mill strategies

Keywords: flotation modeling; flotation per liberation class; flotation per size fraction; copper flotation; froth recovery; mass balance per liberation class

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1– Recuperação metalúrgica em função de tamanho de partícula para minerais distintos (Trahar, 1981)	29
Figura 3.2 – Amostras preparadas para análise de liberação por QEMScan. Fonte: Automated Mineralogy.blogspot.com.....	32
Figura 3.3 – Sequência de imagens de classes de tamanho e liberação para minério de cobre utilizado	32
Figura 3.4 – Distribuição em massa de liberação para um concentrado de cobre.....	33
Figura 3.5 - Partículas contendo dois minerais com distintas proporções	34
Figura 3.6 - Variedade de texturas minerais que seriam associadas a possíveis seções em uma sequência de partículas compostas por dois minerais (adaptado de Spencer e Sutherland, 2000).....	34
Figura 3.7 - Valores médios e desvios-padrão dos graus de liberação aparente em 2D (LA2D LB2D) de acordo com o número de partículas medidas (N) juntamente com o real grau de liberação em 3D (LA3D LB3D) Fonte: Ueda, Oki, and Koyanaka (2016)	35
Figura 3.8 – Diagrama ilustrativo da lógica geral análise de liberação por fração granulométrica. A abordagem de correção estereológica pode ser feita pelo equipamento de análise mineralógica automatizada ou pode ser feita externamente.	38
Figura 3.9 - Diagrama ilustrativo da lógica de análise de liberação por fração granulométrica incluindo a lógica da abordagem de ajuste beta originalmente desenvolvida por Savassi (2006) e adaptada neste trabalho	40
Figura 3.10 - Distribuição de probabilidades de, ao rolar um dado por 12 vezes, obter o valor 4 por um determinado número de vezes.....	42
Figura 3.11 - Possíveis formatos da curva beta.....	43
Figura 3.12– Exemplos de dados de liberação medidos pelo QEMSCAN e de curvas ajustadas pela função beta e teores das frações granulométricas	44
Figura 3.13– Exemplo de estrutura de níveis de caracterização da polpa de minério para fins de balanço. (adaptado de Hodouin, 2010)	47
Figura 3.14 – Resumo do método de reconciliação	50
Figura 3.15 - Distribuição em massa das classes de liberação para a fração granulométrica - 74+44 μ m de um concentrado rougher calcopirítico	55
Figura 3.16 – Ilustração da normalização da distribuição de partículas mistas f m mista - (a) antes da remoção da classe de ganga (b) após a remoção da ganga e normalização pela eq3.12	61
Figura 3.17 – Restrições do balanço por classe de liberação	66

Figura 4.1 – Transferência de massa em uma célula de flotação (adaptado de Laplante et al, 1989).....	74
Figura 4.2 – Diagrama de recuperações nas regiões de polpa e espuma. (Adaptado de Finch e Dobby, 1990).....	76
Figura 4.3- Etapas do arraste mecânico em uma célula industrial de flotação (adaptado de Smith e Warren, 1989).	81
Figura 4.4- A forma da curva empírica para arraste mecânico.	85
Figura 4.5 –Duas condições de distribuição de bolhas para uma mesma vazão de ar	91
Figura 4.6- Diagrama esquemático representando o fluxo de área de superfície de bolha – Sb.	92
Figura 5.1 – Mini Planta Piloto de Flotação	102
Figura 5.2 – Foto e diagrama da cuba MPP com crowder. A marca indica a altura de 2 cm103	
Figura 5.3 – Imagem da cuba MPP com crowder e diagrama de formas geométricas utilizado para calcular os volumes de espuma	103
Figura 5.4 – Diagrama da cuba MPP com crowder indicando as dimensões utilizadas para calcular os volumes de polpa e espuma.....	104
Figura 5.5– Fluxograma e diagrama de disposição das células da MPP para o circuito usado nos ensaios de calibração	105
Figura 6.1 – Distribuição granulométrica e teores de cobre por fração de tamanho.....	112
Figura 7.1 –Comparação entre dados de distribuição granulométrica balanceados e medidos para o concentrado rougher1 do ensaio Cal 03	118
Figura 7.2 – Comparação entre dados de teores de calcopirita por fração granulométrica balanceados e medidos para o concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03.....	119
Figura 7.3 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o rejeito rougher1 do ensaio Cal 03.....	119
Figura 7.4 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o concentrado rougher 2 do ensaio Cal 03.....	119
Figura 7.5 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o rejeito rougher 2 do ensaio Cal 03.....	120
Figura 7.6 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o concentrado scavenger do ensaio Cal 03.....	120
Figura 7.7 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o rejeito scavenger do ensaio Cal 03	120
Figura 7.8 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o concentrado cleaner do ensaio Cal 03	121
Figura 7.9 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o rejeito cleaner do ensaio Cal 03.....	121

Figura 7.10 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para a alimentação do ensaio Cal 03.....	121
Figura 7.11 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para todos os fluxos do ensaio Cal 03.....	122
Figura 7.12 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para todos os fluxos do ensaio Cal 01.....	122
Figura 7.13 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para todos os fluxos do ensaio Cal 02.....	122
Figura 7.14 - Distribuição de massas por classe, segundo o teor volumétrico das classes para a fração -212+150 μ m, do concentrado rougher 1, ensaio Cal 03.....	125
Figura 7.15 - Distribuição de massas por classe, segundo o teor volumétrico das classes para a fração -212+150 μ m, do concentrado rougher 1, ensaio Cal 03; dados medidos pelo QEMScan	125
Figura 7.16 – Distribuições medidas e estimativas iniciais de curva beta para a distribuição de massas por classe, segundo o teor volumétrico das classes para a fração -212+150 μ m do concentrado rougher 1, ensaio Cal 03	126
Figura 7.17 – Comparação entre as distribuições de liberação medidas e as distribuições calculadas com a curva de ajuste beta para a fração -212+150 μ m do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03.....	132
Figura 7.18 – Comparação entre a distribuição de liberação medida e a calculada com a curva de ajuste beta para a fração -212+150 μ m do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03.....	133
Figura 7.19 – Comparação entre a distribuição de liberação medida e a calculada com a curva de ajuste beta para os produtos do ensaio Cal 03	134
Figura 7.20 – Comparação entre a distribuição de liberação medida e a calculada com a curva de ajuste beta para os produtos do ensaio Cal 01	134
Figura 7.21 – Comparação entre a distribuição de liberação medida e a calculada com a curva de ajuste beta para os produtos do ensaio Cal 02	135
Figura 7.22 – Comparação entre a distribuição de liberação balanceada e a calculada com a curva de ajuste beta para os produtos do ensaio Cal 01	138
Figura 7.23 – Comparação entre a distribuição de liberação balanceada e a calculada com a curva de ajuste beta para os produtos do ensaio Cal 02	138
Figura 7.24 – Comparação entre a distribuição de liberação balanceada e a calculada com a curva de ajuste beta para os produtos do ensaio Cal 03	138
Figura 8.1- Gráficos de teor de calcopirita e de recuperações de massa, de calcopirita e de água em função do tempo de retenção do ar na espuma para o rougher 1.....	141
Figura 8.2- Gráficos de recuperação de massas e conteúdo de calcopirita em função da espessura de espuma para o rougher 1	142
Figura 8.3 - Recuperação de ganga e calcopirita em função da recuperação de água Fonte: Santos, 2014	143

Figura 8.4 – Comparação entre o arraste mecânico medido e curvas do modelo de Yianatos para as três alturas de espuma	145
Figura 8.5 - Recuperações de massas no rougher 1 por fração granulométrica e por altura de espuma.....	148
Figura 8.6 - Recuperações de massas e conteúdo de calcopirita no rougher 1 por fração granulométrica.....	149
Figura 8.7– Recuperações de massas por fração de tamanho e tempo de retenção na espuma na etapa Rougher 1.....	150
Figura 8.8- Recuperações de calcopirita no rougher 1 por fração granulométrica	151
Figura 8.9 - Recuperações de calcopirita por fração de tamanho e tempo de retenção na espuma na etapa Rougher 1.....	152
Figura 8.10 - Ilustração do perfil de decaimento exponencial	153
Figura 8.11 - Perfil de recuperação de calcopirita em função da espessura de espuma por fração granulométrica.....	153
Figura 8.12 - Distribuição % em massa por classe de liberação e por fração granulométrica para um fluxo de alimentação	157
Figura 8.13 - Distribuição % em massa por classe de liberação e por fração granulométrica para um fluxo de alimentação a partir da classe 2.....	158
Figura 8.14– Distribuição de calcopirita por classes de liberação, fluxo de alimentação, Cal 03	159
Figura 8.15 – Relação entre a distribuição de massas do concentrado e a da alimentação para as frações -212+150mm e -74+44mm. É notório o aumento da recuperação com o aumento do teor de calcopirita nas classes.	163
Figura 9.1 – Recuperação de calcopirita no rougher 1 por classe de liberação por faixa de tamanho- Gráficos lineares 2D.....	169
Figura 9.2 – Recuperação de calcopirita em função do tamanho e da liberação para as três alturas de espuma – Gráfico de superfície – Vista 1	170
Figura 9.3 – Recuperação de calcopirita em função do tamanho e da liberação para as três alturas de espuma – Gráfico de superfície – Vista 2	170
Figura 9.4 – Dados de recuperação medidos e dados ajustados com a equação de modelamento proposta (9.1) para cada fração granulométrica – Teste Cal 01 – 2 cm de espuma	171
Figura 9.5 – Dados de recuperação medidos e dados ajustados com a equação de modelamento proposta (8.1) para cada fração granulométrica – Teste Cal 02 – 3 cm de espuma	172
Figura 9.6 – Dados de recuperação medidos e dados ajustados com a equação de modelamento proposta (9.1) para cada fração granulométrica – Teste Cal 03 – 4 cm de espuma	173
Figura 9.7 - Área Superficial estimada de calcopirita (cm ² /s) da alimentação.....	178
Figura 9.8 – Razão entre recuperação de calcopirita por classe de liberação e área superficial versus 7 do tamanho de partícula - Teste Cal 03 – 4 cm de espuma.....	180

Figura 9.9 – Fator em função da classe de liberação e tamanho de partícula	180
Figura 9.10 – Para apresentar uma mesma área superficial mineral, o número de partículas finas é bem maior que o de partículas grossas	181
Figura 9.11 - Recuperação de calcopirita medida e calculada por classe de liberação no concentrado rougher 1	183
Figura 9.12 - Razão da recuperação de calcopirita por classe de liberação no concentrado rougher 1 sobre a distribuição de área superficial de calcopirita por classe de liberação na alimentação em função do tamanho de partícula para as três alturas de espuma	184
Figura 9.13 - Razão entre a recuperação de calcopirita por classe de liberação no concentrado rougher 1 e a distribuição de área superficial de calcopirita por classe de liberação na alimentação em função do tamanho de partícula para as três alturas de espuma para a classe com menor teor de calcopirita.....	185
Figura 10.1 – Circuito utilizado nos ensaios e etapas avaliadas neste capítulo	187
Figura 10.2 – Resultados de teor de calcopirita e de recuperações de massa e de calcopirita para os estágios rougher e scavenger dos ensaios de calibração	189
Figura 10.3 – Curvas cinéticas globais para os três ensaios nas etapas rougher 1, rougher 2 e scavenger	192
Figura 10.4 - Recuperações acumuladas nas etapas rougher 1, rougher 2 e scavenger para cada fração granulométrica.....	194
Figura 10.5 – Distribuição da recuperação global e final na linha em cada fração e em cada etapa para o ensaio Cal 03.....	195
Figura 10.6 –Curva cinética da fração 44 mm do ensaio Cal 01 e curvas cinéticas modeladas pelos modelos de primeira ordem de regime tubular e de mistura perfeita.....	196
Figura 10.7 – Correlações entre valores de recuperações calculadas com o modelo cinético de regime tubular e recuperações medidas por fração granulométrica para os três ensaios.	196
Figura 10.8 – Correlações entre valores de recuperações calculadas com o modelo cinético de mistura perfeita e recuperações medidas por fração granulométrica para os três ensaios.	197
Figura 10.9 – Variação da soma dos quadrados das diferenças entre as recuperações medidas e calculadas com os modelos convencionais.....	198
Figura 10.10 - Recuperação simples e acumulada nas etapas rougher1, rougher 2 e scavenger para as frações granulométricas 212,150 e 74µm. Lado esquerdo – recuperações em cada etapa. Lado direito – recuperações acumuladas	199
Figura 10.11 - Recuperação simples e acumulada nas etapas rougher1, rougher 2 e scavenger para as frações granulométricas 44, 20 e <20µm. Lado esquerdo – recuperações em cada etapa. Lado direito – recuperações acumuladas	200
Figura 10.12 – Recuperações do rougher 2 nas classes de liberação em cada fração granulométrica em relação à alimentação do próprio rougher 2	202

Figura 10.13— Recuperações do scavenger nas classes de liberação em cada fração granulométrica em relação à alimentação do próprio scavenger.....	204
Figura 10.14 - Dados de recuperação medidos e dados ajustados com a equação de modelamento proposta (9.1) para cada fração granulométrica do concentrado rougher 2— Teste Cal 03 —.....	205
Figura 10.15 - Razão entre recuperação de calcopirita por classe de liberação e área superficial versus 7 do tamanho de partícula – Rougher 2 Teste Cal 03 –	206
Figura 10.16 Distribuição de recuperação de calcopirita medida e calculada por classe de liberação no concentrado rougher 2	207
Figura 10.17 Distribuição de recuperação de calcopirita medida e calculada por classe de liberação no concentrado rougher 2 para todas as classes acima de 15% cpy.	208
Figura 10.18 - Razão entre recuperação de calcopirita por classe de liberação e área superficial versus 7 do tamanho de partícula – Scavenger Teste Cal 03 —.....	209
Figura 10.19 - Distribuição de recuperação de calcopirita medida e calculada por classe de liberação no scavenger para todas as classes acima de 15% cpy, ensaio Cal 03.....	209

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1– Etapas no processo de balanceamento das classes de tamanho e liberação	49
Tabela 3.2– Dados balanceados globais, por fração granulométrica e de liberação de um fluxo de rejeito rougher 2	67
Tabela 4.1- Alguns modelos matemáticos paralelos que podem ser utilizados em conjunto com o modelo dos compartimentos	98
Tabela 5.1– Dosagens de reagentes utilizadas nos ensaios em planta piloto.....	105
Tabela 5.2– Condições gerais utilizadas nos ensaios de calibração.....	106
Tabela 5.3 - Plano de amostragem para ensaios de calibração	107
Tabela 5.4 – Erros de amostragem segundo Pierre Gy	108
Tabela 6.1 - Resultados de análise química do minério – Alimentação dos ensaios	110
Tabela 6.2 - Distribuição granulométrica, teores e distribuição de cobre por fração da alimentação	111
Tabela 6.3 -Distribuição granulométrica, teores e distribuição de cobre por fração da alimentação	112
Tabela 6.4 - Áreas de seções transversais das células e vazão de ar para cada condição dos ensaios realizados.....	113
Tabela 7.1 - Balanço de massas ensaio Cal 01 – 2 cm de espuma.....	115
Tabela 7.2 – Balanço de massas ensaio Cal 02– 3 cm de espuma	115
Tabela 7.3 – Balanço de massas ensaio Cal 03– 4 cm de espuma	116
Tabela 7.4 - Resultados do balanço por fração do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03.....	118
Tabela 7.5– Resultados de QEMScan para o concentrado rougher 1 do ensaio Cal03	124
Tabela 7.6 - Soma dos quadrados das diferenças entre os valores das distribuições originais de partículas mistas e os valores das curvas beta calculadas para a fração -212+150 μ m do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03	127
Tabela 7.7 - Dados da distribuição beta simples completa para a fração -212+150 μ m do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03	128
Tabela 7.8 – Teores volumétricos calculados para a fração -212+150 μ m do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03.....	129
Tabela 7.9 - Teores mássicos iniciais das classes e o teor total para a fração -212+150 μ m do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03	130

Tabela 7.10 - Teor de calcopirita calculado a partir da distribuição inicial para a fração - 212+150 μ m do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03.....	130
Tabela 7.11 – Distribuição em massas por liberação ajustada para a fração -212+150 μ m do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03	132
Tabela 7.12 – Ajuste BETA da distribuição em massas por liberação para a fração -212+150 μ m do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03.....	133
Tabela 7.13 - Dados reconciliados da alimentação do ensaio Cal 03	136
Tabela 7.14 - Dados reconciliados do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03	136
Tabela 7.15 - Dados reconciliados do rejeito rougher 1 do ensaio Cal 03.....	137
Tabela 7.16 – Teores mássicos médios de calcopirita reconciliados para cada fração de tamanho, após ajuste beta.....	137
Tabela 8.1– Principais resultados globais de processo da etapa rougher dos ensaios de calibração	141
Tabela 8.2 – Principais resultados globais dos ensaios de calibração.....	142
Tabela 8.3 – Modelos acessórios avaliados para o minério como um todo	144
Tabela 8.4 – Grau de arraste mecânico no rougher 1 para os ensaios Cal 01, Cal 02 e Cal 03.....	144
Tabela 8.5 – Parâmetros do modelo de Yianatos para o arraste mecânico – minério global	145
Tabela 8.6 – Parâmetros do modelo de Gorain para a recuperação de água – minério global, Rougher 1	146
Tabela 8.7 – Parâmetros do modelo de Gorain para a recuperação de água – minério global, Rougher 1 (Santos 2014).....	146
Tabela 8.8 - Principais resultados do modelamento do minério global (Santos, 2014).....	146
Tabela 8.9– Distribuição % em massa por classe de liberação em cada fração granulométrica	154
Tabela 8.10– Distribuição % em massa por classe de liberação e por fração granulométrica.....	155
Tabela 8.11– Distribuição % de calcopirita por classe de liberação em cada fração granulométrica	156
Tabela 8.12– Distribuição % de calcopirita por classe de liberação e por fração granulométrica no produto. A soma de todas as classes de tamanho e liberação é igual a 100%......	156
Tabela 8.13– Distribuição % em massa por classe de liberação e por fração granulométrica para um fluxo de alimentação	157
Tabela 8.14– Distribuição % de calcopirita por classe de liberação e por fração granulométrica para um fluxo de alimentação do ensaio Cal 03.....	159

Tabela 8.15– Distribuição % em massas por classe de liberação e por fração granulométrica para o fluxo de concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03.....	160
Tabela 8.16- Distribuição % de calcopirita por classe de liberação e por fração granulométrica para um fluxo de concentrado rougher.....	160
Tabela 8.17– Distribuição % em massa de um concentrado rougher por classe de liberação e por fração granulométrica em relação à proporção de massa flotada de alimentação .	161
Tabela 8.18- Recuperação de massas em cada classe de tamanho-liberação para o fluxo de concentrado Rg 1 ensaio Cal 03.....	161
Tabela 8.19– Recuperações por classe de tamanho e liberação – Rougher 1 – Teste Cal 01 – 2 cm de espuma.....	164
Tabela 8.20- Recuperações por classe de tamanho e liberação – Rougher 1 – Teste Cal 02 – 3 cm de espuma.....	165
Tabela 8.21 - Recuperações por classe de tamanho e liberação – Rougher 1 – Teste Cal 03 – 4 cm de espuma.....	165
Tabela 9.1 – Parâmetros do modelo de recuperação por classe de liberação para cada fração de tamanho – Teste Cal 01 – 2 cm de espuma	173
Tabela 9.2 – Parâmetros do modelo de recuperação por classe de liberação para cada fração de tamanho – Teste Cal 02 – 3 cm de espuma	173
Tabela 9.3 – Parâmetros do modelo de recuperação por classe de liberação para cada fração de tamanho – Teste Cal 03 – 4 cm de espuma	174
Tabela 9.4 - Recuperações por classe de tamanho e liberação – Rougher 1 – Teste Cal 03 – 4 cm de espuma.....	175
Tabela 9.5– Distribuição % em massa por classe de liberação e por fração granulométrica para um fluxo de alimentação	176
Tabela 9.6 – Densidades de cada classe de liberação	176
Tabela 9.7 – Distribuição de recuperação de calcopirita no concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03 em relação à alimentação global.....	179
Tabela 9.8 – Razão entre a recuperação de calcopirita por classe de liberação no concentrado rougher 1 e a distribuição de área superficial de calcopirita por classe de liberação na alimentação	179
Tabela 9.9 – Coeficientes das retas de recuperação sobre superfície de calcopirita versus tamanho de partícula – Rougher 1 – Teste Cal 03	182
Tabela 10.1 - Resultados de teor de calcopirita e de recuperações de massa e de calcopirita para os estágios rougher e scavenger dos ensaios de calibração.....	189
Tabela 10.2 – Tempos de residência nas células rougher e scavenger	192

Tabela 10.3 – Resultado do ajuste do modelo de cinética de primeira ordem em regime tubular para as etapas rougher e scavenger	192
Tabela 10.4 - Recuperações acumuladas nas etapas rougher 1, rougher 2 e scavenger para cada fração granulométrica.....	194
Tabela 10.5 - Soma dos quadrados das diferenças entre as recuperações medidas e calculadas com os modelos convencionais.....	197
Tabela 10.6 – Distribuição % em massa nas classes de liberação por fração granulométrica para o rejeito rougher 1 (alimentação do rougher 2)	201
Tabela 10.7 – Distribuição % em massa nas classes de liberação por fração granulométrica para o rejeito rougher 2 (alimentação do scavenger)	203
Tabela 10.8 – Recuperação acumulada por classe de liberação para a etapa rougher 2, ensaio Cal 03	205
Tabela 10.9 – Coeficientes das retas de ajuste da relação entre a distribuição de recuperação e a superfície de calcopirita	208

SUMÁRIO

1 - Introdução	22
2 - Objetivos.....	27
3 - Revisão Bibliográfica -Parte 1	28
3.1 Granulometria.....	28
3.2 Mineralogia e Classes de Liberação.....	30
3.2.1 Medidas de liberação.....	31
3.2.2 Desvios estereológicos	33
3.2.3 Correção estereológica	35
3.2.4 A função Beta.....	41
3.3 Compatibilização de Dados de Mineralogia e Balanço	44
3.3.1 Balanços de massas e reconciliação de dados	45
3.3.2 Descrição Geral do Método de reconciliação de classes tamanho- liberação de Savassi	48
4 - Revisão Bibliográfica – Parte 2	68
4.1 Modelo dos Compartimentos	72
4.1.1 Mecanismos de transferência de massas	73
4.2 Modelos Paralelos	80
4.2.1 Arraste Mecânico – Descrição Geral	80
4.2.2 Arraste Mecânico – Modelamento	83
4.2.3 Recuperação na Espuma	88
4.2.4 Recuperação na espuma - Modelamento.....	90
4.2.5 Recuperação de água.....	95
5 - Metodologia	100
5.1 Escolha, preparação e caracterização do minério	100
5.2 Preparação da Mini Planta Piloto.....	101
5.2.1 Cálculo da aeração à pressão atmosférica	102
5.2.2 Preparação e medição das células	103
5.3 Ensaios de Calibração.....	104
5.3.1 Balanços de Massas e Determinação das Recuperações	109
6 - Resultados – Parte 1 Caracterização do Minério e Parâmetros dos Ensaios de Calibração.....	110
6.1 Caracterização da amostra inicial.....	110
6.1.1 Caracterização Química e Granulometria	110

6.1.2	Caracterização Mineralógica.....	112
6.2	Parâmetros gerais dos ensaios de calibração	113
6.2.1	Ajuste da aeração	113
6.2.2	Medidas das células para cálculo de volumes de espuma	113
7	Resultados - Parte 2 - Balanços de Massas dos Testes de Calibração.....	114
7.1	Resultados dos balanços globais.....	114
7.2	Resultados balanceados dos ensaios de calibração – Balanço por fração granulométrica	116
7.3	Resultados balanceados dos ensaios de calibração – Balanço por classe de liberação	123
7.3.1	Ajuste da curva beta aos dados de liberação de cada fração de tamanho.....	124
7.3.2	Balanço por classes de liberação a partir dos dados das curvas beta	135
7.3.3	Erros	139
8	Resultados-Parte 3-Avaliação do Modelo dos Compartimentos – Etapa Rougher.....	140
8.1	Avaliação do rougher 1, produto global (“bulk”)	141
8.1.1	Modelamento da célula Rougher 1 para o minério global “Bulk”	143
8.1.2	Questões avaliadas	147
8.2	Avaliação do rougher 1 por fração granulométrica	148
8.2.1	Resultados rougher 1 por fração granulométrica	148
8.2.2	Modelamento rougher 1 por fração granulométrica.....	152
8.3	Avaliação da etapa rougher 1 por classe de tamanho liberação	154
8.3.1	Formatação da análise dos dados e da análise gráfica.....	154
8.3.2	Recuperações por classe de liberação – Rougher 1 – Descrição dos dados.	164
9	Resultados - Parte 4 Novo Modelo para Classes Tamanho Liberação ..	168
9.1	Recuperações por classe de liberação – Rougher 1 – Nova equação para modelamento direto	168
9.2	Relação entre a recuperação e a distribuição de área superficial de calcopirita	174
10	Resultados – Parte 5 Avaliação das etapas Rougher 1, Rougher 2 e Scavenger	187
10.1	Resultados Globais	189
10.2	Recuperação global– Modelos Cinéticos Convencionais	190
10.3	Recuperação por fração granulométrica nas etapas Rougher 1, Rougher 2 e Scavenger.....	193
10.3.1	Recuperação por fração granulométrica – Modelos Cinéticos Convencionais	195

10.4	<i>Recuperação por classes de liberação nas etapas rougher 1, rougher 2 e scavenger</i>	198
10.4.1	Recuperação em relação à alimentação inicial.....	198
10.4.2	Recuperação na etapa (em relação à alimentação da etapa) –Rougher 2	201
10.4.3	Recuperação na etapa (em relação à alimentação da etapa) –Scavenger	203
10.4.4	Modelamento da recuperação por classes de liberação na etapa Rougher 2	204
10.4.5	Modelamento da recuperação por classes de liberação na etapa Scavenger	208
11	-Conclusões	211
12	- Contribuições Originais ao Conhecimento.....	215
Anexo I -Dedução do Modelo dos Compartimentos		222
Anexo II -Condições Operacionais		243
Anexo III -Balanços de Massas e Metalúrgicos Globais e por Fração Granulométrica		247
Anexo IV -Resultados de Análise Mineralógica		277
Anexo V -Resultados de Ajuste Beta		283
Anexo VI -Resultados de Balanço Completo		397
Anexo VII -Resultados dos cálculos de superfície de calcopirita		409

Capítulo 1 - Introdução

O modelamento de processos minerais é relevante para vários propósitos: projeto e desenvolvimento, avaliação e análise de desempenho de processos, escalonamento e projeto de equipamentos e, principalmente, simulação, visando prever o comportamento do minério em diferentes condições de processamento.

Nos últimos 40 anos, um grande número de modelos foi proposto e avaliado. Neste período, os avanços em informática, a evolução das técnicas de caracterização mineralógica e química e o desenvolvimento de novos métodos de controle de processo permitiram incluir diversos aspectos e condições de processo que antes não eram mensuráveis. Ainda assim, até o presente, nenhum modelo é capaz de representar o processo por completo em todas as suas dimensões, sendo necessário estabelecer premissas e restrições a cada método. Este, por sua vez, será mais ou menos adequado para aplicação conforme suas características sejam compatíveis com a natureza das condições a serem simuladas e permitam obter previsões mais confiáveis e com o custo de utilização e/ou tempo de execução menores do que a realização de ensaios físicos. O desafio atual corresponde a consolidar um modelo confiável capaz de simular resultados por classe de conteúdo mineral por fração granulométrica, que seja capaz de prever comportamentos em diferentes condições do processo. Um modelo como este permitirá a integração entre moagem, flotação e outras operações unitárias para uma otimização conjunta de todo o processo.

Este trabalho envolve o desenvolvimento de modelos por classes de tamanho e conteúdo mineral (ou tamanho - liberação). A dissertação de mestrado de minha autoria, intitulada ***Avaliação do Modelo dos Compartimentos aplicado à flotação de minério de cobre***, (Santos, 2014) representa uma base inicial. Nela, o modelo dos compartimentos e modelos acessórios haviam sido avaliados para o minério como um todo (“bulk”) ou, em outras palavras, considerando-se os resultados globais de massas e teores minerais dos produtos obtidos nas etapas de flotação.

Iniciando os estudos do doutorado, a avaliação desta mesma abordagem por classes de tamanho e liberação levou à necessidade de ajustes no método de balanço de massas, bem como ao desenvolvimento de novos modelos para representar a flotação nestas classes.

O primeiro desafio deste estudo residiu em um aspecto essencial: a consolidação de balanços de massas consistentes em todos os níveis e subníveis interligados:

- massas globais,
- teores globais,
- frações granulométricas,
- teores por fração granulométrica,
- distribuição de massas por classes de conteúdo mineral

sendo que havia redundância de dados para os fluxos principais e o cálculo de balanço precisa convergir em todos os níveis.

Até onde foi possível identificar, não existe, até o presente momento (2018), programa comercial de reconciliação de dados que seja capaz de realizar esta convergência de modo direto, *com redundância*, em todos estes níveis. São três os principais aspectos de dificultam a efetivação deste balanço a partir de dados redundantes:

- O primeiro é a propagação de erros, inerente ao processo de amostragem e agravada pela existência dos diversos subníveis de análise. Sobre os erros da amostragem de produtos há os erros de análises químicas destes produtos, os erros da realização das análises granulométricas, os erros das análises químicas por fração e os erros da análise mineralógica para determinação da distribuição de massas em cada classe de conteúdo mineral em cada fração de tamanho.
- O segundo é o tipo de desvio existente na determinação da distribuição mássica por classe de liberação que é realizada por técnicas de análise de imagens. Este tipo de análise determina o teor através da proporção do mineral de interesse *por área de seção transversal* das partículas. O resultado de teor em massa indicado pelo método é calculado ou inferido a partir desta análise por *área*.

Assim, existem desvios nesta distribuição – os chamados desvios estereológicos - que se somam aos erros mais comuns de determinação analítica ou de amostragem.

- O terceiro é o número elevado de restrições a que as classes de liberação estão sujeitas no processo de cálculo. O somatório das massas das classes por fração deve ser igual a 100%, a distribuição de massas ponderada pelos teores das classes deve ser igual ao teor de cada fração granulométrica e o valor de cada classe deve ser consistente com o processo, ou seja, deve ser balanceado com a respectiva classe de todos outros produtos que, por sua vez, seguem as mesmas restrições.

Deste modo, a reconciliação dos dados amostrados envolveu três grandes questões:

1. Que método utilizar para efetuar a correção estereológica dos dados de mineralogia?
2. Como minimizar os erros e desvios inerentes aos subníveis de análise?
3. E, considerando os métodos utilizados para resolver as duas questões anteriores, como realizar um balanço coerente nos níveis global, por tamanho e por classe de liberação?

Para resolver estas questões, foi utilizado o método de ajuste de dados de liberação com a curva de distribuição beta (Savassi, 2006), no qual foram realizadas algumas modificações para aprimorar a reconciliação de dados por fração granulométrica.

Uma vez obtidos os balanços, modelos matemáticos poderiam ser aplicados e os efeitos das diversas variáveis poderiam ser avaliados em qualquer dos níveis.

A avaliação dos modelos por classe de tamanho-liberação envolveu séries de questões interessantes.

A primeira delas refere-se ao efeito físico, sobre a flotação, da proporção do mineral hidrofóbico nas partículas. É bem sabido que, nas partículas, quanto maior a proporção do mineral a ser flotado, maior a recuperação desta classe de partículas. Entretanto, como é este comportamento por classe de liberação e tamanho, de modo conjunto?

Como partículas mistas e finas comportam-se em relação a partículas liberadas e grossas? Como é o comportamento tridimensional tamanho x liberação x desempenho processo? Os resultados permitem identificar ou comprovar subprocessos seletivos para partículas mais hidrofóbicas?

A segunda série de questões está ligada diretamente à primeira e envolve sua representação matemática: seriam as fórmulas matemáticas válidas para o comportamento de cada classe da mesma maneira que o foram para o minério global? Se assim fosse, a fórmula destes modelos para o minério global corresponderia ao somatório dos efeitos verificados por classe, ponderados pela proporção mássica da classe. E sendo assim, teoricamente, quando a proporção de um determinado tamanho fosse alterada por mudança de condições de moagem, por exemplo, o modelo continuaria válido, sendo necessário somente alterar a proporção desta fração de tamanho. A mesma lógica poderia ser aplicada a uma mudança de proporção mineral no minério. Deste modo, *caso* as fórmulas matemáticas para o comportamento de cada classe fossem aplicáveis da mesma maneira que o são para o minério global, então o modelo dos compartimentos e os modelos acessórios poderiam ser muito adequados para uma integração geral entre a flotação e moagem.

A terceira série de questões vai um pouco além da avaliação dos modelos originais. O volume de dados gerados foi muito expressivo e possibilitou a avaliação e verificação de diversos aspectos. Por exemplo, como os modelos cinéticos simples, tão amplamente utilizados para estudos expeditos, são afetados pelo comportamento da espuma? O regime de mistura na espuma pode ser verificado a partir destes dados?

Por fim, caso os modelos avaliados não fossem apropriados ou não apresentassem um ajuste adequado aos dados de liberação, seria possível estabelecer novos modelos que representassem o comportamento das classes? As variáveis deste modelo teriam significado físico? Se não, seria possível estabelecer outros que tivessem? Qual a relação entre o comportamento na flotação e a superfície de mineral hidrofóbico disponível no minério?

Este trabalho pretende explorar estas questões e propor respostas, confirmar hipóteses e conceitos, analisar comportamentos e introduzir novas questões. Como base, serão utilizados resultados de ensaios (testes) realizados com um minério de cobre calcopirítico da região de Carajás, PA, Brasil, processado em Mini Planta Piloto de flotação. Os dados possibilitarão verificar a aplicabilidade do modelo central e dos modelos auxiliares nas condições testadas bem como propor melhorias, ajustes e novos modelos acessórios.

Esta tese está organizada em doze capítulos, dos quais esta introdução é o primeiro. O segundo capítulo apresenta os objetivos específicos da tese. A revisão bibliográfica está subdividida em duas partes, no terceiro e quarto capítulos. No terceiro capítulo, é apresentado o método para o ajuste de dados mineralógicos e cálculo dos balanços metalúrgicos por classe de tamanho e liberação. No quarto capítulo há um resumo sobre modelamento de flotação, uma explanação sobre a equação geral do modelo dos compartimentos e sua fundamentação teórica seguida por revisões específicas dos principais fenômenos físicos relativos à flotação que fazem parte do modelo dos compartimentos bem como descrições de alguns modelos paralelos / cálculos que podem simular cada um destes fenômenos. O quinto capítulo descreve como foram realizados os ensaios e a metodologia geral do estudo. O sexto, sétimo, oitavo, nono e décimo capítulos apresentam os resultados, respectivamente, de Caracterização do Minério e Parâmetros do Processo (6), Balanço de Massas (7), Avaliação do Modelo dos Compartimentos para Etapa Rougher (8), Novos modelos para Classe Liberação (9), Avaliação das etapas Rougher 1, Rougher 2 e Scavenger (10). O décimo primeiro capítulo consolida as conclusões e o décimo segundo apresenta as contribuições originais ao conhecimento.

Capítulo 2 - Objetivos

O objetivo principal deste trabalho *é demonstrar e modelar matematicamente*, a partir de dados experimentais em circuito contínuo com um minério real de cobre calcopirítico, *como é o comportamento da flotação de classes tamanho e liberação*.

Em conjunto com este objetivo, esta tese também pretende:

- Revisar, propor melhorias e consolidar o método de balanço de dados de classes tamanho-liberação de Savassi (2006).
- Verificar se o conjunto de fórmulas e modelos matemáticos utilizados pelo modelo dos compartimentos, que é válido para o comportamento global do minério, é igualmente válido para o comportamento de cada classe.
- Propor novos modelos matemáticos de flotação para o comportamento de classes tamanho-liberação.

Capítulo 3 - Revisão Bibliográfica - Parte 1

Granulometria, Mineralogia, Classes de Liberação e
Reconciliação de Dados

3.1 Granulometria

O efeito do tamanho e da liberação de partículas sobre o desempenho metalúrgico no processo de flotação é bem conhecido, tendo sido reportado logo nos primeiros estudos da área. (Gaudin, 1939, 1957). O trabalho de Trahar (1976) apresenta uma descrição apurada dos estudos feitos até então sobre os efeitos do tamanho de partícula sobre a flotação, tanto em laboratório como em escala industrial. Dados de diversas unidades operacionais mostram que a recuperação na flotação cai rapidamente fora de um tamanho de partícula intermediário, cujos limites dependem do tipo e densidade do mineral flotado, mas que, em geral, estão entre 10 e 100 μ m. A figura 3.1 ilustra este comportamento.

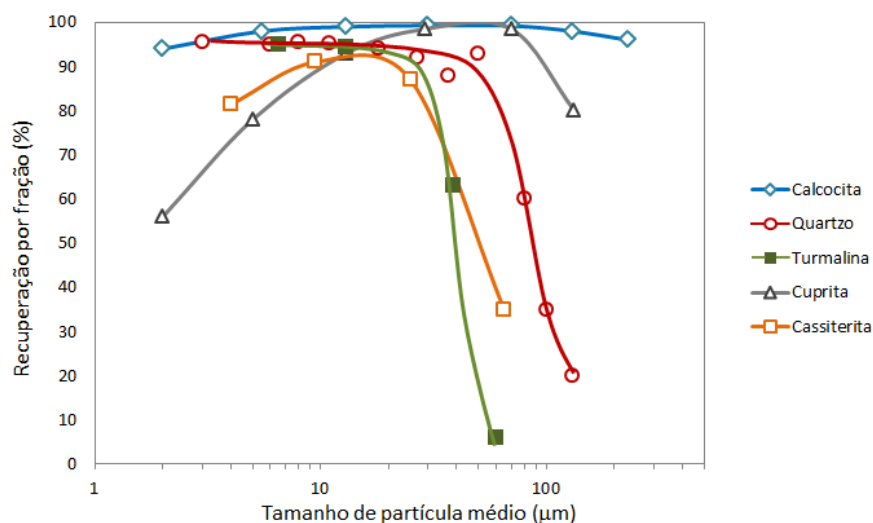


Figura 3.1– Recuperação metalúrgica em função de tamanho de partícula para minerais distintos (Trahar, 1981)

Este resultado pode ser compreendido a partir do comportamento de partículas de tamanhos extremos frente à probabilidade dos subprocessos de flotação: colisão, adesão e desprendimento, conforme descrito por Trahar (1981) e Klassen e Mokrousov (1963).

Partículas muito finas apresentam menor probabilidade de colisão por apresentarem menor área superficial. Além disto, dois outros efeitos dificultam a adesão: partículas muito finas formam suspensões bastante homogêneas e estáveis em água bem como, pela pouca massa, possuem menos energia cinética para romper o filme líquido da interface das bolhas. Deste modo, ao colidir com as bolhas, estas partículas tendem a seguir o fluxo de líquido, o que implica em uma menor probabilidade de adesão. O efeito de desprendimento não é tão expressivo para partículas finas, uma vez que as bolhas são capazes de sustentá-las e mantê-las aderidas enquanto se movem pela polpa e pela espuma. Entretanto, o impacto negativo nas probabilidades de colisão e adesão supera a vantagem da menor probabilidade de desprendimento. A resultante é uma recuperação inferior.

Partículas muito grossas apresentam uma área de superfície maior e, assim, apresentam também uma probabilidade de colisão maior com as bolhas em comparação com outras partículas. Entretanto, partículas mais grossas e pesadas apresentam uma

probabilidade de desprendimento também mais elevada, especialmente na espuma, em que a sustentação física é menor que a da polpa. O maior efeito do desprendimento é considerado como a principal causa da recuperação inferior de partículas mais grossas.

Em todos os casos, a mineralogia e o grau de liberação e exposição do mineral a ser flotado também influenciam no nível de recuperação e o entendimento completo do comportamento mineral requer a análise conjunta dos dados de liberação.

3.2 Mineralogia e Classes de Liberação

A noção de que partículas mistas flutam em velocidades inferiores a partículas liberadas também é bastante antiga. Contudo, a utilização de medidas de liberação para otimizar processos industriais tornou-se mais comum somente a partir dos anos 90, com o advento das técnicas de análise mineralógica usando microscopia eletrônica de varredura e análise de imagens. Como a mineralogia e a liberação são essenciais ao beneficiamento de minérios em todos os processos, o uso e modelamento das informações mineralógicas são o cerne da otimização integrada do processo, desde a britagem até a qualidade do produto final.

Entretanto, a utilização de dados de liberação integrados ao processo traz duas grandes questões relativas a erros de medidas gerados pela própria natureza da mensuração dos dados de liberação.

A primeira é relativa *ao ajuste dos dados de liberação em cada fração granulométrica para que sejam compatíveis com o teor analisado da respectiva fração*. A segunda se refere à *minimização de erros para o fechamento do balanço de massas para a liberação*, que é uma subclasse da fração granulométrica. O método utilizado ***mescla a minimização de erros do balanço com o processo de correção dos dados de liberação para compatibilizá-los com a análise química***.

3.2.1 Medidas de liberação

As medidas de liberação são feitas através da análise de imagem de seções planas, obtidas por cortes transversais de conjuntos de partículas. Assim, as proporções dos diferentes minerais nas partículas são proporções calculadas pela área ocupada por estes minerais nas seções transversais que foram medidas. O método de medida é bem descrito por Savassi (2006):

Para a análise de liberação, uma fração da amostra é resinada em um bloco de epoxy que, depois de endurecer, é cortada e polida para mostrar seções transversais das partículas. Este bloco é colocado sob um microscópio para gerar uma imagem das partículas, enquanto uma composição química aproximada correspondente a cada pixel é determinada por espectrometria de raios-X. A análise de imagem possibilita determinar a liberação de cada partícula individual a ser quantificada em termos do número de pixels de mineral de minério sobre o número total de pixels que formam a imagem da partícula. Ao mesmo tempo, o teor da amostra é estimado iterativamente, à medida que cresce o número de partículas analisadas. Este processo continua até que o teor estimado da amostra se aproxime do teor químico medido, dentro do número de partículas disponíveis para análise. O resultado final é a distribuição em massas das partículas por diversas classes de teor mineral¹, variando de ganga a partículas completamente liberadas de mineral de minério, com diversas classes de partículas mistas. Para resultados representativos, a análise mineralógica de liberação é realizada por fração de tamanho².

A figura 3.2 apresenta amostras preparadas para análise por QEM Scan; a figura 3.3 mostra os resultados de imagens obtidos com minério de cobre utilizado, utilizando-se o QEMScan como equipamento de medida e a figura 3.4 mostra a distribuição de liberação, em massa, para cada fração de tamanho.

¹ Grifo meu

² Idem



Figura 3.2 – Amostras preparadas para análise de liberação por QEMScan. Fonte: Automated Mineralogy.blogspot.com



Figura 3.3 – Sequência de imagens de classes de tamanho e liberação para minério de cobre utilizado

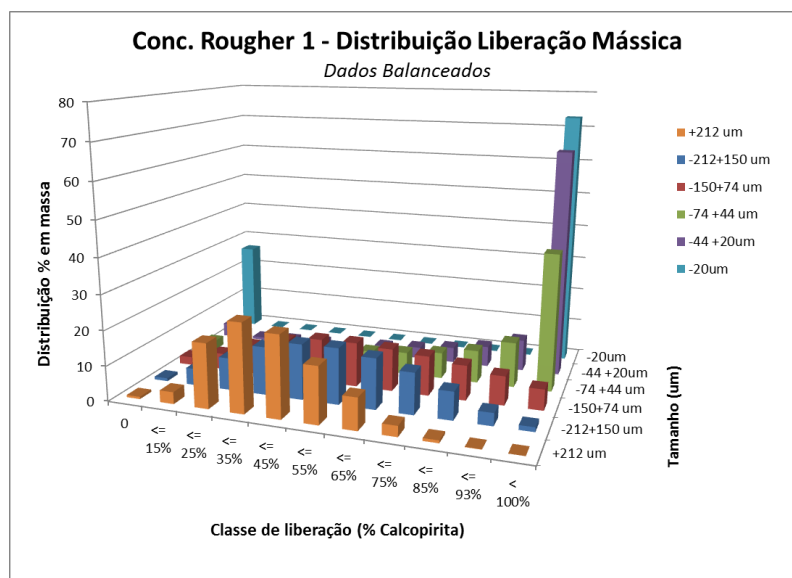


Figura 3.4 – Distribuição em massa de liberação para um concentrado de cobre

É importante frisar que, nesta técnica, efetivamente, o que é medido é o teor *em área* da partícula. Estes teores são transformados em teores em volume e, então, precisam ser transformados em *teores em massa*, que são a representação típica de teores químicos.

Para obtenção do teor em massa e comparação com o teor químico, é necessário corrigir a distribuição obtida em área ou linearmente para compensar os *desvios estereológicos*.

3.2.2 Desvios estereológicos

Desvios estereológicos ocorrem devido à existência de mais de uma possibilidade de medida para uma mesma partícula, dependendo da posição em que o corte transversal da seção polida é feito (Spencer e Sutherland, 2000). Como um exemplo, a figura 3.5 apresenta uma foto de partículas que permite visualizar parcialmente a distribuição mineral tridimensional. A figura 3.6 ilustra algumas das inúmeras possíveis texturas minerais que seriam associadas a algumas seções feitas com partículas contendo dois minerais.

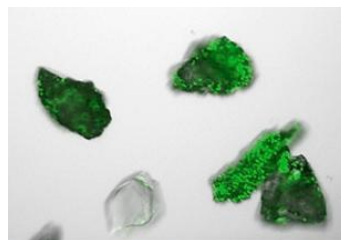


Figura 3.5 - Partículas contendo dois minerais com distintas proporções

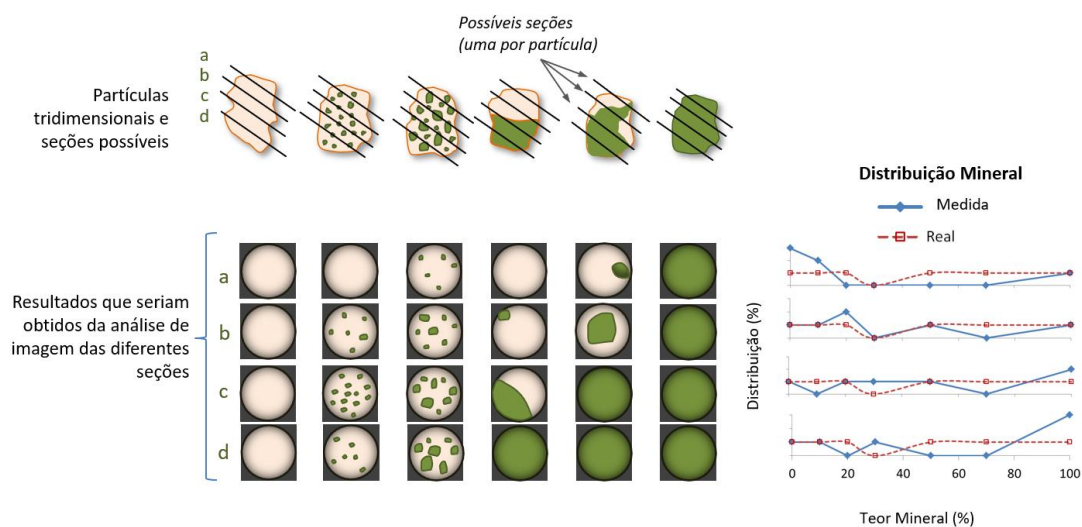


Figura 3.6 - Variedade de texturas minerais que seriam associadas a possíveis seções em uma sequência de partículas compostas por dois minerais (adaptado de Spencer e Sutherland, 2000)

Deste modo, qualquer resultado de análise das proporções minerais das partículas, em área, é apenas uma das possibilidades geradas entre um universo de outras seções que poderiam ser obtidas simplesmente por uma alteração na posição do corte das seções da mesma amostra. Se a textura mineral é simples, a análise de seções por área tende a superestimar a quantidade de partículas liberadas de mineral de minério ou de ganga já que seções que mostram um único mineral podem representar (erroneamente) um corte localizado em uma porção monomineral de uma partícula mista. Acrescente-se a isto o fato de que estas possibilidades são multiplicadas pelo número de partículas e se pode perceber o tamanho dos desvios existentes em uma análise de liberação por área.

3.2.3 Correção estereológica

O primeiro passo para reduzir estes desvios envolve analisar a liberação em área de um número suficiente de partículas.

Em relação a isto, o trabalho de Ueda, Oki, and Koyanaka (2016) avaliou o efeito do número de partículas na determinação da liberação. Neste estudo, os desvios estereológicos foram avaliados através de uma série de análises numéricas em mais de um milhão de partículas bifásicas com várias proporções e distribuições de tamanhos de grãos de mineral valioso.

Os autores demonstraram que o que normalmente era conhecido como desvio estereológico seria melhor interpretado como uma justaposição de erros. Parte do desvio se deve a uma dispersão estatística correlacionada com o número de partículas analisadas e a outra parte seria o viés estereológico *inevitável*, que sempre superestima o grau de liberação em 2D. O estudo mostrou que um número elevado de análises de seção de partículas é capaz de reduzir a dispersão do grau de liberação aparente em 2D. No entanto, o desvio estereológico real – a diferença entre áreas (2D) e volumes (3D) – não pode ser diminuído apenas aumentando o número de partículas medidas. A figura 3.7, extraída deste estudo, apresenta os resultados deste trabalho para as duas fases, A e B, deste conjunto de partículas bifásicas.

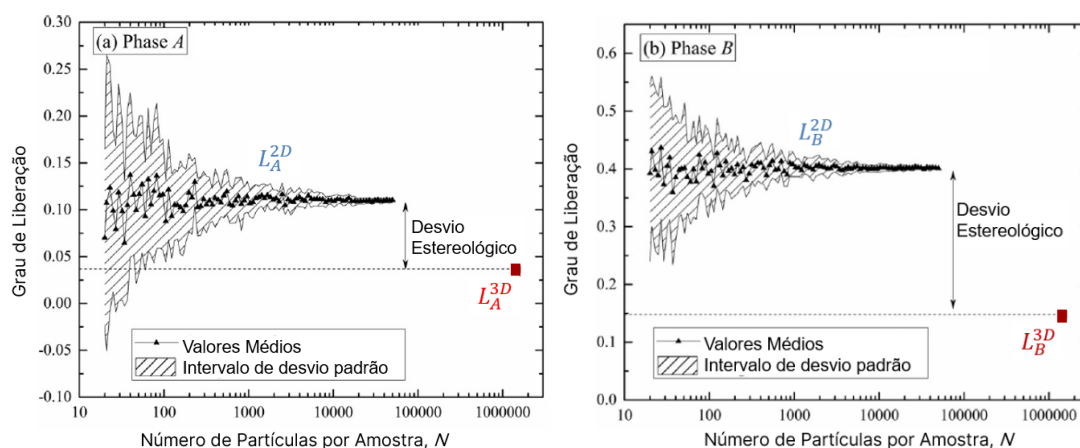


Figura 3.7 - Valores médios e desvios-padrão dos graus de liberação aparente em 2D (L_A^{2D} , L_B^{2D}) de acordo com o número de partículas medidas (N) juntamente com o real grau de liberação em 3D (L_A^{3D} , L_B^{3D}) Fonte: Ueda, Oki, and Koyanaka (2016)

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Além disso, em um estudo posterior, Ueda, Oki, and Koyanaka (2018) também confirmaram que o viés estereológico é amplificado em sistemas de partículas multifásicas ou com texturas relativamente simples.

Portanto, em qualquer estudo de liberação quantitativo, é essencial

1. *medir um elevado número de partículas e*
2. *fazer uma correção e estimar dados em massa ou volume (3D) a partir da análise de área de superfície da seção(2D).*

O número mínimo de partículas depende de características do minério como demonstrado em Ueda, Oki, and Koyanaka (2016). Considerando dados deste estudo de Ueda et al, a medida de 2000 partículas é mais do que suficiente para determinar a liberação 2D de minerais valiosos disseminados e de granulação pequena, quando estes minerais estão presentes em menor proporção no minério.

Quanto à correção estereológica, vários métodos de correção foram e tem sido desenvolvidos desde que Gaudin registrou a questão do viés estereológico em 1939. Com a suposição de que o minério continha grãos de tamanho regular e teor constante, Gaudin definiu uma razão entre a liberação areal e volumétrica, chamada fator de travamento. Os fatores de travamento variaram entre 1,2 e 2,4 (Miller e Lin, 1988), o que já demonstrou que esse desvio poderia ser tão alto quanto 140%. Petruk (1978) usou uma metodologia semelhante. Estes métodos caíram em desuso com o advento de análises mineralógicas mais precisas que permitiram o avanço de novas abordagens.

Algumas destas abordagens envolvem a sobreposição de padrões de textura mais realistas no minério (Barbery, 1991; Gay, 1995; Hilden and Powell, 2018). Outras usam uma função transformacional kernel³ para relacionar a liberação nas duas dimensões diferentes. (Miller e Lin, 1988; King e Schneider, 1997; Fandrich et al., 1998; Spencer e Sutherland, 2000). Mais recentemente, o uso de microtomografia

³ Neste caso da correção, a função kernel é uma função que matematicamente permite inferir possíveis distribuições espaciais 3D a partir de uma distribuição em linear (1D) ou em área (2D).

computadorizada de raio X para medida 3D de minerais também tem sido utilizada como referência para cálculos de correção estereológica (Wang, Lin, and Miller 2017; Reyes et al. 2018).

Independentemente da natureza da correção, espera-se que a distribuição de liberação corrigida em massa seja representativa da alíquota analisada que, em estudos de liberação, é uma fração de tamanho de uma amostra mineral.

O principal critério para avaliar esta representatividade é a equivalência entre o teor obtido pela análise química e o teor calculado pelo somatório ponderado da distribuição de liberação calculada em massa e do teor de cada classe também calculado em massa. Em outras palavras, pelo balanço das classes, a soma dos teores em massa de todas as classes de liberação ponderadas pela proporção de cada classe deve ser igual ao teor químico da fração granulométrica analisada.

Este é um critério a ser cumprido - ou uma função objetivo - em todas as abordagens. A Figura 3.8 apresenta um diagrama mostrando a lógica geral da correção para uma amostra de uma fração de tamanho de um minério.

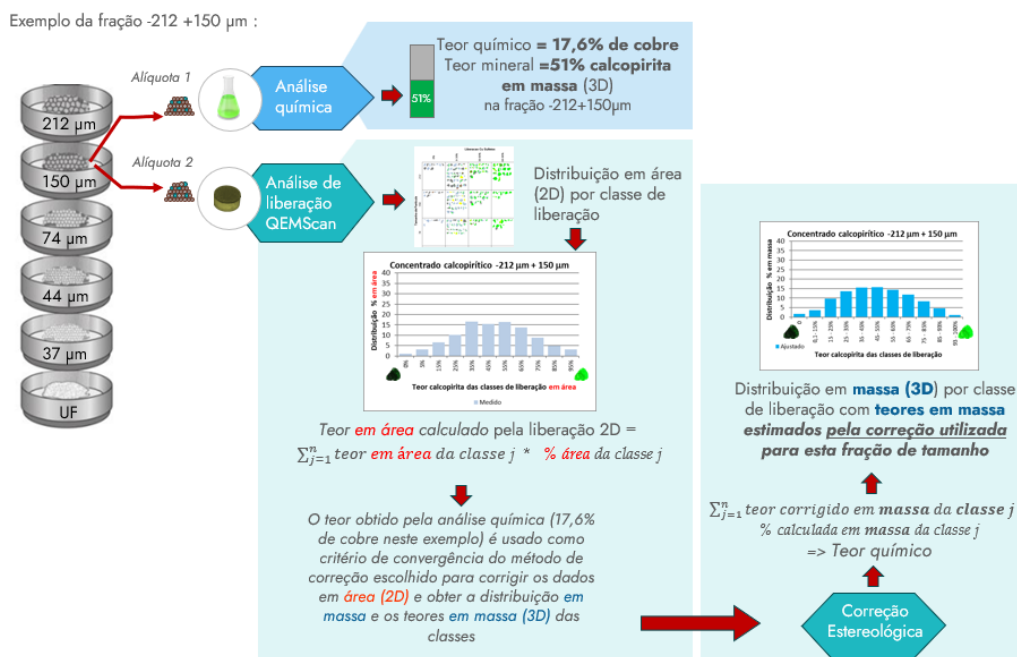


Figura 3.8 – Diagrama ilustrativo da lógica geral análise de liberação por fração granulométrica. A abordagem de correção estereológica pode ser feita pelo equipamento de análise mineralógica automatizada ou pode ser feita externamente.

Assim como os principais equipamentos de mineralogia automatizada, o equipamento QEMScan utilizado neste trabalho possui *algoritmos internos que transformam os teores e distribuições por classe de liberação de área para volume ou massa*. O trabalho de Spencer e Sutherland (2000) indica que o QEMScan utiliza métodos de correção estereológica de transformação de kernel, através do software que é parte de seu sistema.

A questão é que, ainda que esteja restrito pelo fato de que a soma ponderada das distribuições mineralógicas em massa tenha de ser compatível com o teor químico, o problema do cálculo da distribuição e teores 3D tem diversas soluções possíveis. Um resultado de uma abordagem de correção estereológica de uma amostra é apenas uma possibilidade inferida. Este resultado pode estar próximo da realidade da amostra ou distante dela.

Dito de outra maneira, matematicamente, qualquer correção estereológica corresponde a um problema *mal posto* ou *inverso*: há várias possibilidades de distribuições em massa que podem ser compatíveis com uma distribuição em área.

Deste modo, além de escolher um equipamento ou método de correção e obter um resultado que seja válido para cada alíquota de fração granulométrica da amostra, há uma questão probabilística a ser resolvida. Esta questão é:

Qual é a distribuição mineralógica por classes de liberação que tem a maior probabilidade de representar a realidade tridimensional e mássica do minério?

Este tipo de pergunta pode ser tratado por métodos de inferência estatística. No entanto, uma inferência estatística adicional requer critérios adicionais para restringir o campo de soluções possíveis e obter a distribuição mineralógica mais provável, mais realista, mais representativa do minério.

O método desenvolvido por Savassi (2006) – que serviu de base bem como foi adaptado para desenvolver esta tese - utiliza a função estatística *beta* para fazer esta inferência, incluindo, como critério adicional e como parte do método, o balanço de massas do circuito que gerou os diferentes produtos avaliados no processo de beneficiamento mineral. A Figura 3.9 apresenta estes dados.

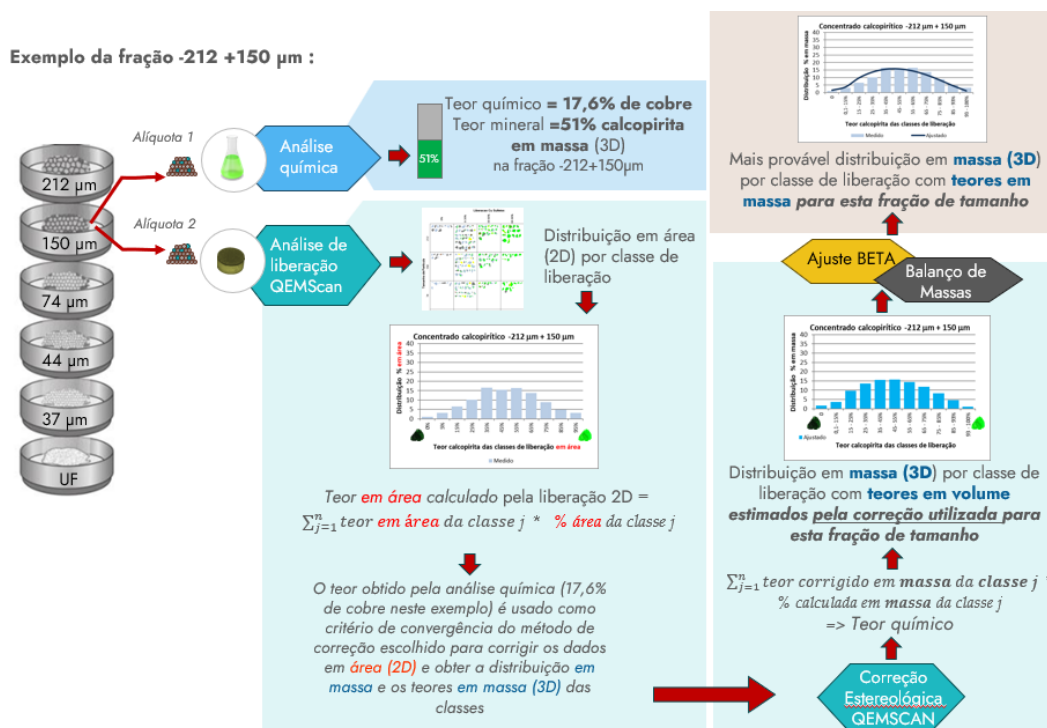


Figura 3.9 - Diagrama ilustrativo da lógica de análise de liberação por fração granulométrica incluindo a lógica da abordagem de ajuste beta originalmente desenvolvida por Savassi (2006) e adaptada neste trabalho

De fato, ao avaliar o comportamento **de um processo** por classes de liberação, os teores químicos *de todos os fluxos* devem consistentes entre si *de acordo com a configuração do circuito*. Porém, essa consistência do processo só é alcançada após a reconciliação do balanço de massa, que ajusta e modifica todos os teores de amostra medidos para atingir valores que representam o processo de estado estacionário.

Portanto, *correções estereológicas que ajustam os dados de liberação aos teores de amostra medidos não serão totalmente compatíveis com os teores de amostra reconciliados do balanço de massa, simplesmente porque o balanço de massas ajusta os teores.*

Uma abordagem integrada é necessária devido a essa interdependência de:

- **teores medidos** que representam a proporção mineral na amostra e em suas frações de tamanho;

- **liberação** que representa a distribuição desse mineral por classes em uma fração de tamanho de amostra, mas é medida por meio de análise de imagem 2D, sujeita a vieses estereológicos;
- **balanço de massa até frações de tamanho** que deve representar o comportamento desse mineral em um processo de estado estacionário, interconectando diferentes fluxos representados por amostras e suas frações, cujos teores devem ser matematicamente ajustados para refletir o regime estável.
- **balanço de massas completo até as classes de tamanho e liberação** que devem poder ser reconciliados a partir dos resultados obtidos de distribuição mineralógica de classes de liberação.

Como já dito, a abordagem de Savassi (2006) considera todos estes aspectos e tem por base o uso da função beta para corrigir a distribuição mineralógica a partir dos dados de processo, análises químicas, granulométricas, balanços de massas e análises de liberação mineralógica automatizada. A abordagem completa será detalhada no item 3.3, logo depois da descrição da função Beta.

3.2.4 A função Beta

A função beta é uma função de distribuição desenvolvida por Thomas Bayes no século XVIII com o objetivo de estimar a probabilidade real de um evento a partir da frequência observada de ocorrência deste evento em um número finito de observações. Como um exemplo, qual é a probabilidade de obter um valor *quatro* quando se joga um dado completamente simétrico em um plano? Teoricamente, o valor seria igual a $1/6$. Entretanto, se o dado for lançado **12 vezes**, seria possível ter certeza absoluta que o dado forneceria o valor *quatro* por **duas vezes**? A resposta é não, mesmo sabendo que o valor de probabilidade de $1/6$ é correto. O fato é que a probabilidade teórica somente é obtida com um número *infinito* de lances de dados. A ocorrência do evento em um número finito de observações estará sujeita a uma distribuição de probabilidades, como mostra a Figura 3.10.

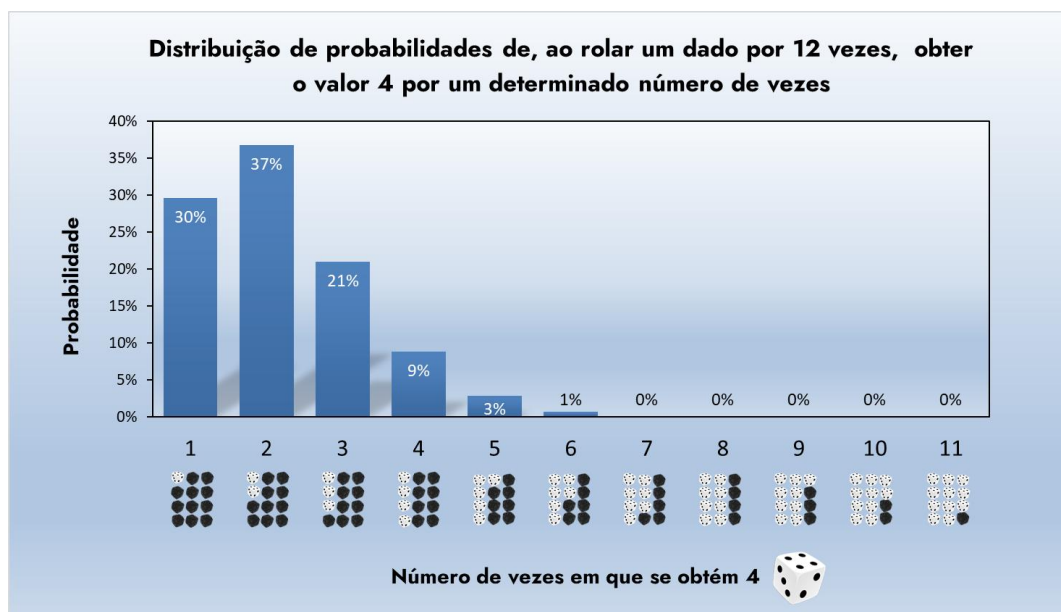


Figura 3.10 - Distribuição de probabilidades de, ao rolar um dado por 12 vezes, obter o valor 4 por um determinado número de vezes

Em casos mais práticos, muitas vezes a pergunta é invertida: considerando um determinado número de ocorrências m (quantas vezes se obtêm quatro) a partir de um número de observações n (quantas vezes o dado é lançado) como é possível estimar a distribuição de probabilidade real de se obter o evento desejado, se fosse realizado um número infinito de observações, considerando uma probabilidade teórica p ?

A distribuição beta é o modo de determinar esta probabilidade. Além de ser utilizada em cálculos estatísticos, é muito útil em diversas aplicações, principalmente por sua flexibilidade para representar diversas formas de distribuição. Considerando as definições de m , n e p já mencionadas, a distribuição beta é definida por:

$$Beta(m, n) = \int_0^1 p^{m-1} \cdot (1 - p)^{n-1} dp; \quad m > 0, \quad n > 0 \quad (Eq. 3.1)$$

Esta distribuição tem sido utilizada em cálculos de liberação há vários anos, de maneiras distintas. Barbary(1991) e King (2001) reportaram sua utilização como forma de representar a liberação. Considerando que o teor mineral real das partículas (g) é o valor a ser alcançado em um número infinito de determinações mineralógicas,

(o que seria equivalente à probabilidade teórica p) a fórmula da curva beta é escrita como:

$$Beta(a, b) = \int_0^1 g^{a-1} \cdot (1 - g)^{b-1} dg; \quad a > 0, \quad b > 0 \quad (Eq. 3.2)$$

Onde g representa o teor de partícula, ou o teor médio de uma classe de partículas, como fração em massa ou em volume, e a e b são os parâmetros que definem a função.

A função beta é bastante flexível. Dependendo da combinação de a e b , seu formato varia de sinusoidal para o formato de U, passando por uma forma linear. A Figura 3.11 apresenta os diversos formatos de curva que podem ser alcançados com esta distribuição.

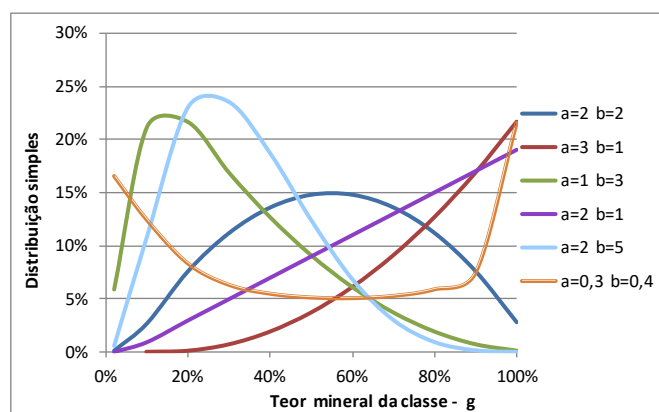


Figura 3.11 - Possíveis formatos da curva beta

A função beta é definida dentro do intervalo $0 < g < 1$, sem considerar as extremidades $g=0$ e $g=1$, equivalentes a um teor igual a zero (ganga) ou teor igual a 1 (mineral minério totalmente liberado), onde matematicamente a função não é aplicável. Assim, *o uso da função beta é válido para partículas compostas.*

Em linhas gerais, a utilização da curva beta para representar a mineralogia corresponde a realizar uma regressão para obter os parâmetros a e b da curva que melhor se ajuste aos dados mineralógicos de tal modo que o teor calculado a partir da ponderação desta distribuição seja compatível com o teor mineral na fração de tamanho. A Figura 3.12 ilustra a representação mineralógica pela curva beta.

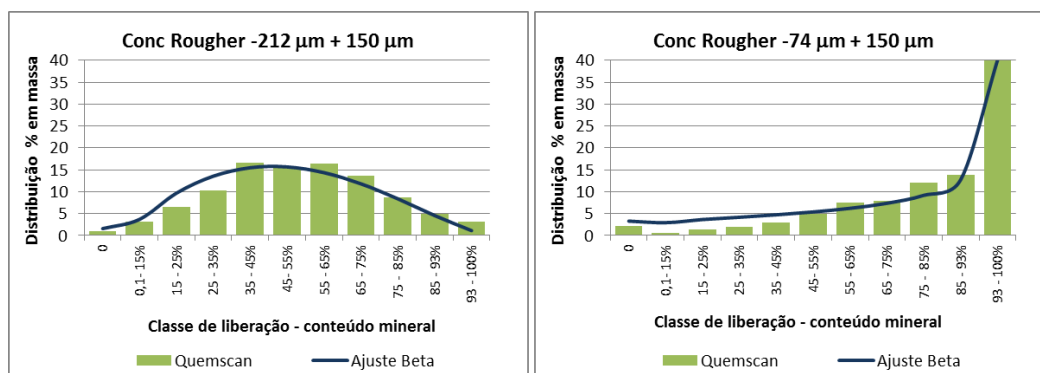


Figura 3.12– Exemplos de dados de liberação medidos pelo QEMSCan e de curvas ajustadas pela função beta e teores das frações granulométricas

Tipicamente, este tipo de ajuste – assim como outros tipos de correção estereológica – é aplicado para cada fração granulométrica, visando atingir o valor determinado pela análise química *medida* desta fração. Cada amostra é analisada independentemente do resultado da reconciliação do balanço de massas de processo.

O problema do uso da correção estereológica para cada amostra independentemente do processo de reconciliação do balanço metalúrgico reside no fato de que a análise mineralógica está muito sujeita à propagação de erros da amostragem e à representatividade limitada do número de partículas. Além disto, o balanço de massas e metalúrgico ajusta e modifica os teores químicos dos produtos e os dados de liberação necessitam refletir este ajuste. Então, ainda que melhore consideravelmente os dados medidos diretamente pela análise automatizada, o uso de correção estereológica independentemente do balanço pode gerar recuperações acima de 100% para algumas classes.

3.3 Compatibilização de Dados de Mineralogia e Balanço

A abordagem utilizada para lidar com este problema neste trabalho é a desenvolvida por Savassi (2006) em que os dados de liberação devem ser compatibilizados com os dados metalúrgicos (vazão de fluxos, teores globais, distribuição de tamanho e teores

por fração), uma vez que estes últimos são muito mais representativos do processo, já que as amostras contêm massa significativamente maior.

O método tem a vantagem de realizar, ao mesmo tempo, a minimização da dispersão de dados e a compatibilização entre os teores químicos após balanço e os obtidos pela liberação utilizando um ajuste dos dados de liberação com uma função beta. Neste trabalho, foram realizadas modificações no procedimento original visando melhorar o processo de ajuste.

3.3.1 Balanços de massas e reconciliação de dados

Em um processo, os fluxos estão sujeitos a flutuações momentâneas. Além disto, as amostras tomadas destes fluxos estão sempre sujeitas a erros de amostragem e erros de análises químicas, mineralógicas ou de granulometria. Deste modo, a soma dos fluxos mássicos amostrados dos produtos de um processo – ou a soma devidamente ponderada de qualquer dos atributos destes fluxos – não é nunca exatamente igual ao correspondente fluxo de alimentação.

O termo balanço de massas refere-se à estimativa matemática dos valores dos fluxos mássicos de sólidos que representam o comportamento deste processo em regime permanente e, portanto, atendem às condições de conservação de massas. Os chamados balanços metalúrgicos incluem os minerais ou metais de interesse. Neste sentido, os balanços permitem avaliar dimensões *quantitativas (massas)* e *qualitativas (teores)* do processo de modo fisicamente consistente. Na linguagem coloquial, o termo balanço de massas costuma se referir ao conjunto de balanço de massas e metalúrgico.

Embora não seja o melhor método, a prática mais comum para o cálculo de balanços em circuitos industriais contínuos é a estimativa dos fluxos mássicos através dos teores metálicos do minério. As fórmulas dos dois produtos e dos três produtos costumam ser as mais utilizadas, desde os primórdios da flotação, conforme indica o texto de Taggart (1945).

Entretanto, este método está amplamente sujeito a erros. A utilização das fórmulas de teores assume com total certeza um processo em regime permanente e não mede as vazões dos fluxos, o que não possibilita a verificação de desvios nas vazões. Assume-se que os fluxos de alimentação de cada operação ou etapa são a soma perfeita dos concentrados e rejeitos. Embora isto deva ser correto para um processo relativamente estável no curso de um tempo razoável – algumas horas, por exemplo – momentaneamente, os fluxos apresentam variações, podem ocorrer vazamentos, acúmulos ou transbordos que irão alterar as vazões. Além disto, há questões relativas a tempo, método ou forma de amostragem que, em usinas industriais, utiliza amostras instantâneas e, portanto, sujeitas a variações. A estimativa de fluxos mássicos utilizando somente os teores pode ser muito distorcida quando o processo não é muito estável ou quando há questões de amostragem.

Atualmente existem métodos para medir as vazões dos fluxos diretamente e de modo confiável. As amostras podem ser submetidas a análises de granulometria, teores por fração e classes de liberação. Isto significa que existem diversas fontes de dados sobre as quais o balanço pode ser obtido e, quando todas as medidas são feitas, há **redundância de dados**. Nestes casos, *em um processo estável e bem amostrado, os fluxos mássicos medidos devem ser compatíveis com os teores químicos analisados e esta compatibilidade deve ser verificada nos diversos níveis dentro de desvios razoáveis*.

Matematicamente, *quanto maior a redundância de um conjunto de dados, maior a confiabilidade do balanço*. (Hodouin, 2010). Entretanto, também é maior o esforço de cálculo necessário, já que o balanço final deve ser coerente em todos estes níveis e compatíveis com os dados amostrados. A Figura 3.13 apresenta um diagrama esquemático mostrando um exemplo de estrutura de níveis de caracterização de uma polpa de minério para fins de balanço.

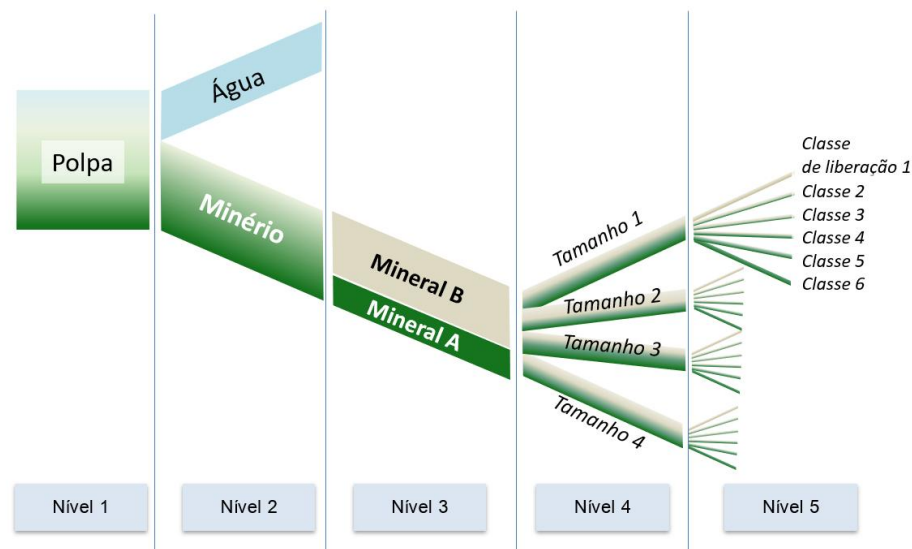


Figura 3.13– Exemplo de estrutura de níveis de caracterização da polpa de minério para fins de balanço. (adaptado de Hodouin, 2010)

A abordagem utilizada para um balanço completo e coerente nestes níveis é a *reconciliação de dados*, descrita em 1961 por Kuehn and Davidson e que envolve o uso de multiplicadores de Lagrange para obter o melhor conjunto de dados que solucione o sistema de equações que representam o processo tomando como base os dados amostrados e as estimativas de erros a eles associados (Hodouin, 2010). O resultado é um conjunto de valores ajustados que atenda a todas as restrições de conservação de massas, com desvio mínimo possível em relação aos dados amostrados.

O método matemático de ajuste utilizado já é bastante consolidado e incorporado em diversos programas (softwares) técnicos. Uma descrição detalhada do método pode ser encontrada em Hodouin (1980) e uma revisão geral sobre reconciliação pode ser vista no trabalho de Crowe (1996). É *fundamental* que o programa de balanços de massas seja capaz de lidar com redundância de dados em todos os níveis disponíveis para reconciliação. Em outras palavras, o programa *deverá* ser capaz de convergir a valores de balanço a partir de dados de entrada independentes de vazão e de análise química e de distribuição granulométrica em vez de apenas estimar a vazão a partir da análise química ou da granulometria. A maioria dos programas comerciais possui

algoritmos capazes de realizar esta reconciliação até o nível de análises químicas por fração granulométrica (nível 4).

Ainda assim, é necessário utilizar uma abordagem específica para realizar a reconciliação no nível de classes de liberação e inseri-la no método de balanço de massas, já que não existe software comercial capaz de realizar esta convergência, com redundância, neste subnível, que seria o nível 5.

O fato de que os balanços de massas deste estudo tenham sido realizados por reconciliação de dados, com redundância em todos os níveis até teores por granulometria, o distingue de outros trabalhos em que os dados mássicos são estimados pelos teores ou em que a alimentação é calculada a partir da soma direta somente dos produtos finais.

3.3.2 Descrição Geral do Método de reconciliação de classes tamanho-liberação de Savassi

Os dados metalúrgicos são balanceados sequencialmente, de acordo com a hierarquia—balanços de massa e metalúrgicos globais feitos primeiramente e utilizados como condição restritiva para os balanços por fração granulométrica – e, então, os resultados do balanço granulométrico são usados para restringir o balanço de massas da liberação, conforme sequência hierárquica realizada no trabalho de Savassi (2006) para balanceamento dos dados.

A tabela 3.1 sumaria as etapas. A Figura 3.14 ilustra o método.

Tabela 3.1– Etapas no processo de balanceamento das classes de tamanho e liberação

Etapas	Atividade
1. Amostragem	Garantir um processo estável e uma campanha rigorosa para minimizar os desvios no balanço global, bem como garantir massa de amostra representativa dos fluxos
2. Balanços globais de água, massas e teores químicos	Reconciliar as vazões totais de sólidos e de água bem como os teores químicos de cada fluxo
3. Conversão de teores químicos em teores minerais, para o minério e por fração granulométrica	Calcular os teores dos minerais a partir dos teores químicos dos fluxos balanceados e dos teores químicos em cada fração granulométrica medida.
4. Balanços por fração granulométrica	Reconciliar as vazões de sólidos e os teores minerais de cada fração granulométrica em cada fluxo, utilizando como condição de restrição o fato de que o somatório das frações granulométricas deva ser igual ou o mais próximo possível dos resultados de cada fluxo global já balanceado.
5. Reconciliação de dados de liberação	Ajustar os dados mineralógicos de cada fração granulométrica de cada fluxo a uma curva beta de tal modo que a curva seja o mais representativa dos dados mineralógicos amostrados bem como apresente um somatório de massas e teores mineralógicos igual ou o mais próximo possível do resultado ajustado de teor cada fração granulométrica
6. Balanços por liberação	Reconciliar os dados de distribuição mássica de cada fração mineralógica em cada fração granulométrica de cada fluxo para o processo.

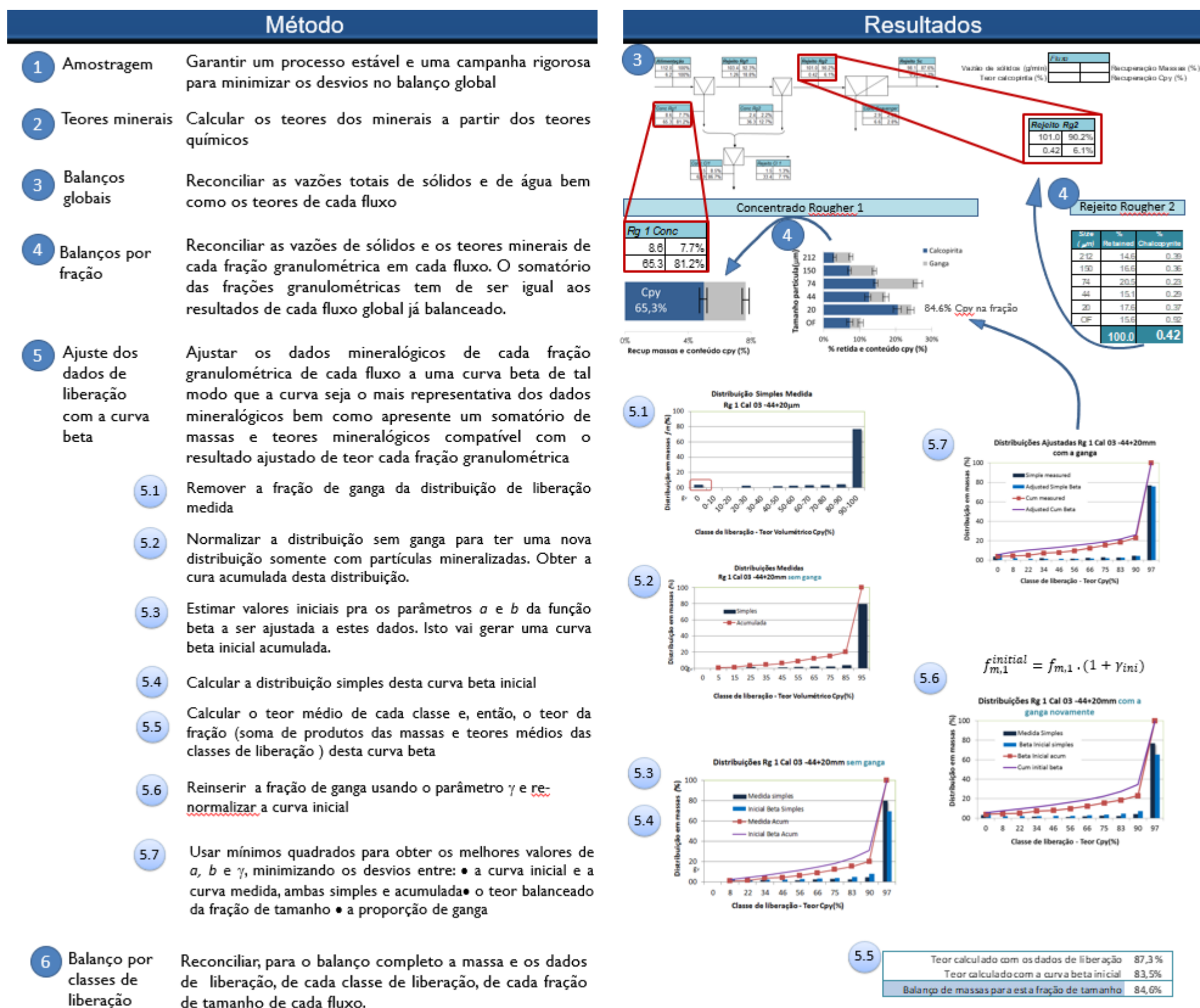


Figura 3.14 – Resumo do método de reconciliação

Etapa 1 – Amostragem

Todo o ensaio e a amostragem devem ser rigorosamente planejados e conduzidos de tal modo a garantir a máxima representatividade das amostras e o mínimo de erros. Preferencialmente, tanto as vazões quanto os teores devem ser medidos visando um balanço com máxima redundância e desvios mínimos.

Etapa 2 - Balanços globais: água, massas e teores de minério

Os balanços globais de água e minério são determinados utilizando-se um programa computacional de reconciliação, utilizando como dados de entrada tanto as vazões medidas de minério e de água quanto os teores químicos, assim como as estimativas de erros de cada uma destas medidas.

Matematicamente, sejam considerados:

- M_{gl} = vazão global medida de massas dos sólidos em cada fluxo
 - $g_{e,gl}$ = teor em massa do elemento e na massa global de sólidos de cada fluxo, obtido por análise química
 - W_{gl} = vazão global medida de água em cada fluxo
 - e as estimativas de erros em cada um destes pontos, ΔM_{gl} , $\Delta g_{e,gl}$, ΔW_{gl}
- Conforme já dito, a amostragem deve ter a máxima representatividade possível, para *garantir que estes erros sejam mínimos*.

Os balanços globais irão gerar massas balanceadas de minério, água e teores químicos globais. Como dados de saída, então, tem-se:

- M_{gl}^* = vazão global *balanceada* de massas dos sólidos em cada fluxo
- $g_{e,gl}^*$ = teor em massa *balanceado* do elemento e na massa de sólidos de cada fluxo
- W_{gl}^* = vazão global *balanceada* de água em cada fluxo
- os resíduos da reconciliação destes dados

Onde o símbolo (*) indica que o dado foi ajustado pela reconciliação do balanço global sendo, portanto, mais representativo do processo em regime permanente. Como este é o

primeiro nível de balanceamento, *é absolutamente essencial que os balanços sejam bastante coerentes e apresentem os menores resíduos possíveis*, para que a propagação de erros seja minimizada nos subníveis.

Etapa 3 - Conversão de teores químicos em teores minerais

A transformação dos valores de uma dada composição *mineral* - como calcopirita, bornita e calcosita - em teores químicos metálicos (cobre), é feita diretamente através da proporção dos elementos químicos na estrutura dos minerais puros. O cálculo recíproco, a transformação de valores de teores químicos de um minério em uma composição mineral, pode ser simples ou complexo e dependerá da quantidade de minerais que apresentam elementos comuns.

Quando o elemento de interesse está presente no minério em apenas um mineral, todo o metal pode ser considerado como pertencente ao mineral.

Em termos gerais, seja:

- $g_{m,gl}$ = teor em massa do mineral ***mrl*** nos sólidos de cada fluxo

e, conforme definido no item anterior:

- $g_{e,gl}$ = teor em massa do elemento ***e*** nos sólidos de cada fluxo

Então, para o caso específico de metais de interesse contidos em um único mineral:

$$g_{m,gl} = \frac{g_{e,gl}}{\text{proporção do elemento } e \text{ no mineral } mrl} \quad \text{(Eq. 3. 3)}$$

Por ser bastante direto e simples, este tipo específico de conversão para teor mineral pode tanto ser realizado a partir dos teores químicos amostrados quanto a partir dos teores químicos já balanceados globalmente, sem interferência no resultado final quando há somente interesse no mineral de cobre e quando o balanço não depende dos teores para determinação das vazões. Neste trabalho, a conversão foi realizada numa etapa

intermediária, após o balanço global, que foi feito com os teores de cobre, e antes dos balanços por fração.

Neste caso, nesta etapa, como dado de entrada, tem-se:

- $g_{e,gl}^*$ = teor em massa *balanceado* do elemento *e* na massa de sólidos de cada fluxo

E, portanto, como dado de saída:

- $g_{m,gl}^*$ = teor em massa *balanceado* do mineral *mrl* na massa de sólidos de cada fluxo

Novamente, o símbolo asterisco (*) indica que os dados foram ajustados na reconciliação do balanço global ou diretamente obtidos a partir dos dados ajustados.

Para minérios mais complexos, em que o metal de interesse está presente em mais de um mineral, é importante realizar a conversão para teores minerais a partir dos teores químicos amostrados, ou seja, antes de realizar qualquer balanço. O trabalho de Whiten (2007) apresenta cálculos de conversão para este tipo de minério.

Etapa 4 – Balanços por fração granulométrica e teor mineral por fração

A etapa seguinte envolve o balanço por fração granulométrica. Considerando que a amostragem global tenha sido feita de modo adequado e que a planta tenha estado em regime, os resultados de balanço global terão apresentado valores baixos de resíduos. Sendo assim, os balanços globais são representativos.

Deste modo, na execução do balanço por fração granulométrica, *os valores globais já obtidos no primeiro balanço devem ser mantidos.* Isto irá garantir que os valores das frações sejam ajustados para alcançar o valor global, que é o mais confiável, e não o contrário.

Dentro do processo de reconciliação, que também deve ser realizado em um programa computacional apto a lidar com redundância em diversos níveis, *isto significa associar*

desvios mínimos aos dados globais, desvios que sejam próximos de zero ou estejam no limite mínimo permitido para que o programa alcance a convergência. Para os dados medidos de frações granulométricas e seus respectivos teores, as estimativas de erro serão indicadas de acordo com a qualidade dos dados amostrados para cada fração.

Assim, sejam os dados de entrada:

- ms_i = proporção percentual em massas medida da fração granulométrica ***i***, resultante da análise granulométrica, sendo que os valores de *i* variam de $i=1$ até o número total de frações determinadas na análise granulométrica, ***ng***;
- $g_{ms\ i}$ = teor em massa do mineral ***mrl*** na massa de sólidos da fração granulométrica ***i***, obtido a partir da conversão dos resultados de análise química por fração granulométrica para teor mineral, conforme indicado na etapa anterior;
- as respectivas estimativas de desvios de cada dado Δms_i , $\Delta g_{ms\ i}$

Como resultados principais, esta etapa irá gerar, além dos resíduos:

- ms_i^{**} = proporção percentual em massas *balanceada* da fração granulométrica ***i***;
- $g_{ms\ i}^{**}$ = teor em massa do mineral ***mrl*** *balanceado* na massa de sólidos da fração granulométrica ***i***

sendo que o processo de reconciliação para gerar estes resultados deve estar sujeito à condição de que, para cada fluxo, a somatória ponderada dos teores reconciliados das frações granulométricas seja igual ou o mais próxima possível do teor global já balanceado. Isto é ilustrado no item 4 da figura 3.14 e, matematicamente, isto significa impor a equação 3.4 como restrição:

$$\sum_{i=1}^{ng} ms_i^{**} \cdot g_{ms\ i}^{**} = g_{m\ gl}^{*} \quad (Eq. 3. 4)$$

Para convergir, o processo de reconciliação por fração granulométrica necessitará ajustar um pouco os dados de balanço global.

Estes novos valores de dados globais, dadas as restrições impostas, devem estar muito próximos dos valores obtidos nos balanços globais. Então, tem-se também, como resultado deste processo:

- M_{gl}^{**} = vazão global *balanceada* de massas dos sólidos em cada fluxo, *minimamente ajustada* pelo balanço por fração granulométrica
- $g_{m\ gl}^{**}$ = teor em massa global *balanceado* do mineral **mrl** na massa de sólidos de cada fluxo, *minimamente ajustado* pelo balanço por fração granulométrica

Resta somente a compatibilização e o balanço dos dados de liberação

Etapas 5 - Compatibilização dos dados de liberação

Uma distribuição de liberação gerada por mineralogia automatizada é usualmente realizada por fração granulométrica. Cada fração granulométrica **i** é apresentada em até 12 classes de teor mineral *volumétrico* g_{vlj} , sendo que cada classe de liberação **j** contém uma proporção em massa f_m do total de partículas analisadas, equivalente a uma proporção em volume f_{vl} .

O gráfico da figura 3.15 apresenta a distribuição em massa das classes de composição mineral para a fração granulométrica -44+20 μ m de um concentrado rougher calcopirítico. É importante lembrar que a definição de limites de classe indicadas pela leitura do QEMScan correspondem a teores *volumétricos*, g_{vl} .

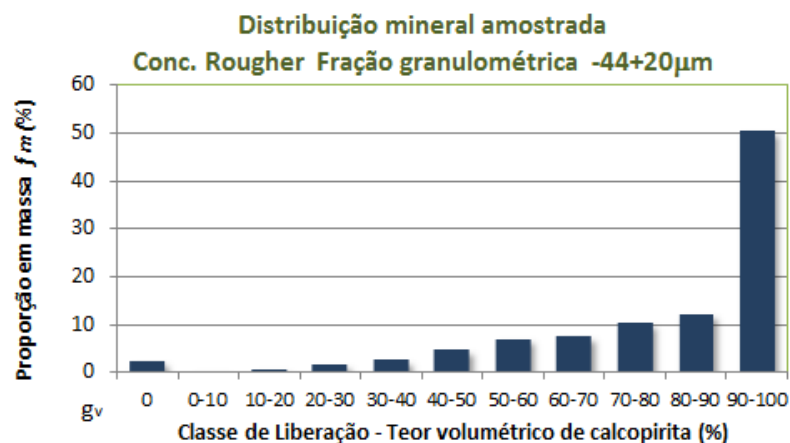


Figura 3.15 - Distribuição em massa das classes de liberação para a fração granulométrica -74+44 μ m de um concentrado rougher calcopirítico

Este é outro aspecto que foi modificado no método. Originalmente, no trabalho de Savassi (2006), tanto as distribuições por classe quanto os teores mineralógicos das classes eram tomados do QEMScan como dados *volumétricos* para o início dos cálculos.

Nesta tese, como forma de promover uma reconciliação mais eficaz, as distribuições medidas – os dados de entrada de distribuição por classe – já foram tomadas como dados de massa diretamente do QEMScan (f_m), enquanto os dados iniciais de teores foram os volumétricos, cuja abordagem convertia em mássico após o ajuste da curva beta ($g_v \Rightarrow g_m$). Isto é possível apenas porque a conversão de teor da classe em volume para teor em massa é feita pelas densidades que tem um valor médio para cada classe (Veja Eq 3.7). Assim, ter as distribuições por classe medidas pelo QEMScan já em massa como dado de entrada adianta o ajuste.

Neste trabalho, para *cada fração granulométrica analisada*, foram utilizadas 11 classes sendo que a classe $j = 1$ corresponde à ganga ($g_{vl, 1} = 0\%$), enquanto a classe 11 corresponde ao mineral quase completamente liberado e completamente liberado ($90\% < g_{vl, 11} \leq 100\%$ mineral). A escolha e a definição, no equipamento de medida, de uma classe que contenha tanto mineral liberado como quase completamente liberado é importante para utilização do método, como será detalhado mais adiante.

As partículas compostas são associadas a classes intermediárias, de teores *volumétricos* minerais que variam em intervalos de 10 pontos percentuais ($0,1\% < g_{vl, 2} < 10\%$; $10\% < g_{vl, 3} < 20\%$; $90\% < g_{vl, 11} \leq 100\%$). Para comparação com os teores analisados quimicamente, é necessário converter tanto estes limites de classes quanto o teor médio de cada classe em teores por *massa*, g_m .

Cada classe j tem um limite inferior para o teor mineral, lw_j , e um limite superior, up_j , sendo que o limite inferior da classe lw_j é igual ao limite superior da classe antecedente up_{j-1} . Por exemplo, a classe $j=4$ tem $lw_4 = 20\% (= up_3)$ e $up_4 = 30\%$. Do mesmo modo, cada classe j tem um teor médio $\bar{g}_{vj}$ entre up_{j-1} e up_j . O teor médio de cada classe depende da distribuição da curva beta, como mostra a equação 3.5.

$$\bar{g}_{vlj} = \frac{a}{a+b} \cdot \frac{\text{Beta}(a+1, b, up_j) - \text{Beta}(a+1, b, lw_j)}{\text{Beta}(a, b, up_j) - \text{Beta}(a, b, lw_j)}, \quad 2 < j < 11 \quad (\text{Eq. 3.5})$$

No conjunto, o teor volumétrico médio da *i*-ésima fração granulométrica $\bar{g}_{vsi}$ calculado a partir desta distribuição de liberação é dado pelo somatório:

$$\bar{g}_{vsi} = \sum_{j=1}^{11} (\bar{g}_{vlj} \cdot f_{vlj}) \quad (\text{Eq. 3.6})$$

O teor calculado por esta equação deve ser comparado ao *obtido pelo balanço para a fração granulométrica i*. Como o teor do balanço é proveniente da análise química e equivale a um teor em *massa*, é necessário converter este teor volumétrico em teor mássico, o que é feito utilizando-se as densidades, ρ , do mineral hidrofóbico e da amostra. O teor mássico médio de cada classe mineral $\bar{g}_{mlj}$ é calculado pela eq 3.7.

$$\bar{g}_{mlj} = \bar{g}_{vlj} \cdot \frac{\rho_{\text{mineral}}}{\rho_{\text{amostra}}} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

O teor mássico médio de cada fração granulométrica será determinado a partir destes dados de liberação de modo semelhante ao da equação 3.6. Deste modo, seja f_{mj} proporção em massa de cada classe de liberação *j* para um dado tamanho de partícula *i*. Então, o teor mássico calculado pela liberação para este tamanho de partícula $\bar{g}_{msi}$ é dado pela eq 3.8.

$$\bar{g}_{msi} = \sum_{j=1}^{11} (\bar{g}_{mlj} \cdot f_{mlj}) \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Este teor mássico médio obtido pela ponderação das classes de liberação certamente será distinto do teor obtido no balanço por fração. O objetivo da interpolação dos dados é reconciliar a distribuição da liberação com este teor, de tal modo que o teor ajustado

$\bar{g}_{ms\ i}^{***}$ seja igual ao teor mineral da fração granulométrica obtido pelo balanço das frações, $g_{ms\ i}^{**}$:

$$\bar{g}_{ms\ i}^{***} = g_{ms\ i}^{**} \quad (Eq. 3. 9)$$

Este teor ajustado será, na verdade, o somatório dos teores ajustados em cada classe mineral, ponderados por sua proporção:

$$\bar{g}_{ms\ i}^{***} = \sum_{j=1}^{11} (\bar{g}_{m\ l, j}^{***} \cdot f_{m, j}^{***}) \quad (Eq. 3. 10)$$

Onde o sobrescrito *** indica o valor ajustado de cada dado no nível de liberação. Além disto, por conservação de massas, a soma das frações ajustadas necessitará ser igual a 1:

$$\sum_{j=1}^{11} f_{m, j}^{***} = 1 \quad (Eq. 3. 11)$$

Assim, o problema consiste em determinar os valores ajustados das frações $f_{m, j}^{***}$ e os teores ajustados $\bar{g}_{m\ j}^{***}$ de tal modo a atender à restrição de conservação de massas (eq 3.11) e ao resultado já obtido do balanço por fração (eq 3.10) o que é feito com a curva beta.

O cálculo se inicia com uma estimativa de uma curva beta utilizando valores estimados de **a** e **b**. O método dos mínimos quadrados é utilizado para ajustar os valores dos parâmetros visando minimizar a diferença entre:

- esta curva estimada e os dados medidos pelo QEMScan,
- o teor determinado a partir desta distribuição estimada e o teor obtido pelo balanço de massas para a fração granulométrica
- a ganga determinada pela curva estimada e a ganga analisada, o que corresponde a um parâmetro específico, detalhado a seguir.

E, desta forma, os parâmetros ajustados são, matematicamente, os que melhor representam a amostra, permitindo que o teor calculado pela curva beta seja o mais

próximo possível dos dados de balanço e, ao mesmo tempo, considerem os dados amostrados.

Antes de iniciar estes cálculos, no entanto, é necessário resolver uma questão matemática. A função beta não é aplicável aos extremos, *não* sendo definida para os valores zero e um ($g=0$ e $g=1$ ou 100%). As distribuições de liberação são sempre apresentadas com classes de ganga $g=0$, o que é essencial, e usualmente incluem classes de partículas totalmente liberadas ($g=1$ ou 100%) em separado das demais, ou seja, há separação entre a classe de partículas quase liberadas ($90 < g < 100\%$) e a classe de partículas totalmente liberadas ($g=100\%$). Assim, para utilizar a função beta, segundo o método original, seria necessário remover tanto *as partículas de ganga* quanto *as partículas totalmente liberadas*, e então normalizar e aplicar a função somente para classes de partículas mistas. Posteriormente, depois do ajuste, a função seria recomposta para incluir as classes retiradas.

A utilização desta abordagem original funcionava em parte dos casos. Entretanto, com a remoção de ambas as extremidades da distribuição de classes e aplicação do ajuste beta somente nas partículas intermediárias, sem contar as totalmente liberadas, em muitos casos, o ajuste da curva ficava bem justo aos dados amostrados das classes de partículas intermediárias. O método normalmente não ocasionava grandes mudanças nos valores da classe completamente liberada, dada a restrição do teor químico. Entretanto, por causa disto, quase todo o erro era lançado sobre a proporção de ganga. Isto podia levar a uma proporção de ganga muito maior do que seria razoável, o que era incompatível com os dados das amostras.

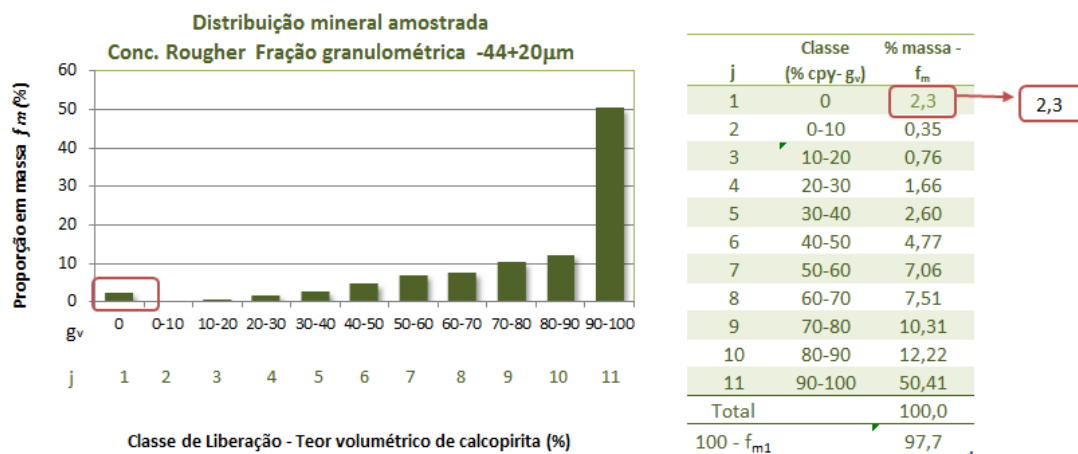
Visando otimizar e tornar os cálculos mais robustos, o QEMScan foi ajustado para disponibilizar dados de partículas totalmente liberadas juntamente com as partículas quase liberadas, de $g = 90$ até 100% gerando uma classe $0,9 < g_{11} \leq 1$, de tal modo a ser necessário apenas retirar as partículas de ganga⁴. *Esta é uma das distinções desta*

⁴ Embora, *em termos estritamente matemáticos*, fosse necessário remover as partículas de teor igual a 100%, a incorporação das partículas liberadas à classe anterior possibilita o uso da curva beta para este novo intervalo como se fosse misto, ou seja, o valor de $g_v = 1$ deixa de existir numericamente e passa a ser incluído junto com o que seria a classe $g_v = 90-100\%$ ou $0,9-1$. Antes da incorporação da classe liberada, esta classe teria um teor médio teórico de cerca de 95%. A diferença é que, com a incorporação,

abordagem em relação à abordagem original, em que tanto as partículas de ganga quanto as partículas 100% liberadas eram removidas antes do ajuste. A remoção somente da ganga facilita os cálculos e torna o ajuste mais compatível com os dados das amostras dos fluxos. A figura 3.16 ilustra o procedimento de redistribuição.

Para remover a classe de ganga, $f_{m,1}$, é necessário normalizar a distribuição de proporções das classes mistas ($j = 2$ até $j=11$) de modo que seu somatório seja igual a 1. Para isto, é gerada uma distribuição em que cada classe $f_{m\text{ mista},j}$ é calculada a partir de:

$$f_{m\text{ mista},j} = \frac{f_{m,j}}{1 - f_{m,1}} \quad (\text{Eq. 3. 12})$$

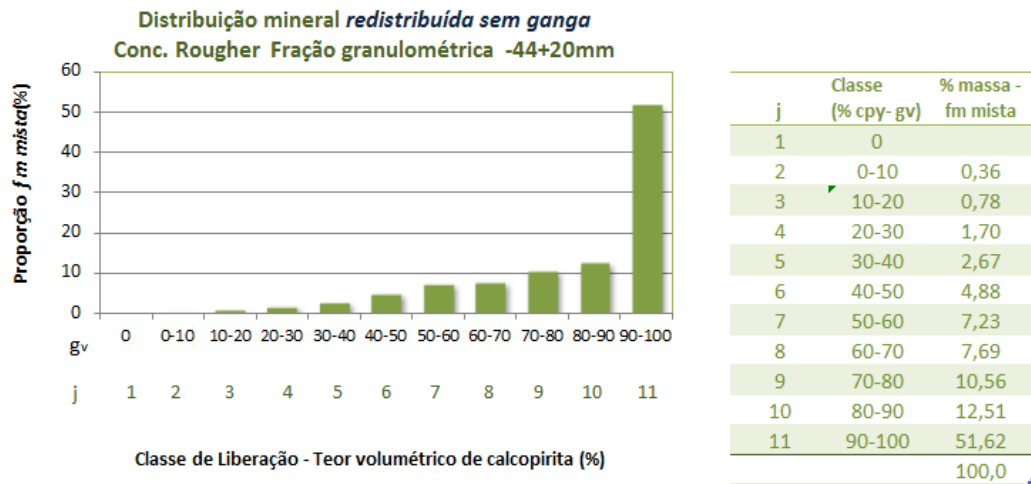


(a)

o teor retro-calculado pela curva beta desta classe (gv) será maior, algo em torno de 97-98%, o que matematicamente permite o uso da curva e, fisicamente, inclui a classe liberada. O mesmo não pode ser feito para a ganga, por que a proporção da ganga é bastante elevada em vários fluxos, gerando um valor médio da classe muito próximo de zero o que provoca a não convergência da curva.

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.



(b)

Figura 3.16 – Ilustração da normalização da distribuição de partículas mistas $f_{m\ mista}$ - (a) antes da remoção da classe de ganga (b) após a remoção da ganga e normalização pela eq3.12

E a partir desta distribuição mista simples, $f_{m\ mista, j}$, a distribuição acumulada é calculada a partir de:

$$F_{m\ mista, j} = \sum_{j=2}^{11} f_{m\ mista, j} \quad (Eq. 3. 13)$$

Assim, sem a ganga, é possível ajustar uma curva beta a esta distribuição normalizada de partículas mistas.

Para isto, utiliza-se a curva *beta incompleta*⁵, onde **a** e **b** são os parâmetros a serem ajustados, e up_j é o limite superior da classe **j**, equivalente ao valor *nominal* de teor g_v máximo para cada classe (10%, 20%, 30%, etc) e $F_{mmista, j}$ é a distribuição acumulada das partículas mistas até up_j . A função beta que melhor se ajuste aos dados medidos será a $F_{m\ mista, j}^{ajust}$ definida pelos melhores valores possíveis de a e b.

$$F_{m\ mista, j}^{ajust} = Beta(a, b, up_j), \quad 2 < j < 11 \quad (Eq. 3. 14)$$

⁵ A distribuição beta corresponde à curva de distribuição acumulada até 1 (ou 100%). A distribuição *beta incompleta* é a curva acumulada até qualquer outro ponto <1.

Como a função beta acumulada é uma função padrão da maior parte dos programas computacionais de planilhas matemáticas, isto permite a utilização de uma planilha normal para este cálculo, no Excel, por exemplo. Para a primeira obtenção dos valores da distribuição acumulada, *é necessário estimar um valor inicial para os parâmetros a e b , que serão ajustados posteriormente*. Sejam estes parâmetros iniciais chamados de a_{ini} e b_{ini} .

$$F_{mista,j}^{inicial} = Beta(a_{ini}, b_{ini}, up_j) , \quad 2 < j < 11 \quad (Eq. 3.15)$$

A partir desta função acumulada inicial, uma distribuição simples inicial $f_{mista,j}^{inicial}$ pode ser obtida para cada classe mista $j > 2$:

$$f_{mista,j}^{inicial} = Beta(a_{ini}, b_{ini}, up_j) - Beta(a, b, up_{j-1}) , \quad 2 < j < 11 \quad (Eq. 3.16)$$

Com o estabelecimento da curva a partir de a e b , é necessário recalcular o teor volumétrico médio de cada classe para esta distribuição beta estimada, conforme indicado anteriormente, equação 3.5. Em seguida, é necessário transformar este teor em teor mássico conforme equação 3.7.

$$\bar{g}_{vlj} = \frac{a}{a+b} \cdot \frac{Beta(a+1, b, up_j) - Beta(a+1, b, lw_j)}{Beta(a, b, up_j) - Beta(a, b, lw_j)} , \quad 2 < j < 11 \quad (Eq. 3.5)$$

$$\bar{g}_{mlj} = \bar{g}_{vlj} \cdot \frac{\rho_{mineral}}{\rho_{amostra}} \quad (Eq. 3.7)$$

Com a curva beta e os valores de teores médios para as partículas mistas, está feito um ajuste parcial.

A questão agora é estabelecer qual seria o valor inicial e a fórmula de ajuste para ganga, porque a distribuição final precisa conter todas as classes e o ajuste precisa ser realizado simultaneamente com a ganga e partículas mistas. A distribuição de partículas mistas será ajustada alcançando-se o melhor valor para os parâmetros a e b da curva beta. E a ganga?

Para o ajuste da ganga, um fator γ é definido. A abordagem equivale a permitir alterações do valor de ganga medido a partir de um fator ajustável, no caso, γ , que pode ser entendido como uma percentagem de variação possível no valor de ganga. A fórmula está indicada na equação 3.17.

$$f_{m,1}^{ajust} = f_{m,1} \cdot (1 + \gamma) \quad (Eq. 3. 17)$$

Assim, obter um valor inicial para a ganga, $f_{m,1}^{inicial}$, equivale a estabelecer uma estimativa inicial para γ , γ_{ini} :

$$f_{m,1}^{inicial} = f_{m,1} \cdot (1 + \gamma_{ini}) \quad (Eq. 3. 18)$$

Uma vez estabelecidos a fórmula e o valor inicial para a ganga, é necessário reincorporá-la e renormalizar a curva para obter a distribuição total inicial, de $j = 1$ até $j=11$, fechando em 100% incluindo novamente a ganga.

O valor para $j=1$ é dado por esta equação anterior, eq 3.18. Os valores de $j=2$ até $j=11$, neste ponto do cálculo, ainda pertencem à distribuição somente de partículas mistas ajustadas pela beta inicial. Ao reincorporar a ganga, estas proporções precisam ser renormalizadas conforme equação 3.19:

$$f_{m,j}^{inicial} = f_{m,mista,j}^{inicial} \cdot (1 - f_{m,1}^{inicial}), \quad 2 < j < 11 \quad (Eq. 3. 19)$$

A partir destas informações, é possível compor a curva acumulada completa $F_{m,j}^{inicial}$:

$$F_{m,j}^{inicial} = f_{m,1}^{inicial} + \sum_2^j f_{m,j}^{inicial} \quad (Eq. 3. 20)$$

Com estas relações prontas, basta determinar os valores de a , b e γ que melhor se ajustem aos dados de mineralogia bem como proporcionem teores compatíveis com os teores já balanceados. Para determinar os valores de a , b e γ utiliza-se o método dos mínimos quadrados. Pela descrição original da abordagem de reconciliação de balanço de Savassi, eram minimizadas as seguintes funções:

- A diferença entre a distribuição de partículas mistas calculada pela curva beta $f_{m\ mista,j}^{inicial}$ e a distribuição de partículas mistas medida $f_{m\ mista,j}$, dividida pelo número de classes mistas:

$$S_1(a, b, \gamma) = \sum_{j=2}^{j=11} \left(f_{m\ mista,j}^{inicial} - f_{m\ mista,j} \right)^2 / n \quad (Eq. 3. 21)$$

- A diferença entre a distribuição acumulada de partículas mistas calculada pela curva beta $F_{m\ mista,j}^{inicial}$ e a distribuição acumulada de partículas mistas medida $F_{m\ mista,j}$, dividida pelo número de classes mistas:

$$S_2(a, b, \gamma) = \sum_{j=2}^{j=11} \left(F_{m\ mista,j}^{inicial} - F_{m\ mista,j} \right)^2 / n \quad (Eq. 3. 22)$$

- A diferença entre o teor do balanço para a fração granulométrica i , $g_{m\ i\ balanço}$, e o teor calculado pela ponderação dos teores médios de cada classe e a distribuição de liberação inicial $\sum_{j=1}^{11} (\bar{g}_{mj} \cdot f_{mj})$:

$$S_3(a, b, \gamma) = \sum_{j=1}^{j=11} \left(g_{m\ i\ balanço} - \sum_{j=1}^{11} (\bar{g}_{mj} \cdot f_{mj}) \right)^2 \quad (Eq. 3. 23)$$

No método original, a soma destas três equações compunha a função objetivo a ser minimizada.

No trabalho desta tese, além destas três funções, foi acrescentada uma quarta, visando garantir que a distribuição da ganga também tivesse desvios mínimos em relação ao valor medido. Esta é a diferença entre a proporção de ganga $f_{m,1}^{inicial}$ estimada utilizando γ e a ganga medida $f_{m,1}$:

$$S_4(a, b, \gamma) = \left(f_{m,1}^{inicial} - f_{m,1} \right)^2 \quad (Eq. 3. 24)$$

E ainda, como neste processo de minimização o mais importante é garantir que o teor seja compatível, também foi acrescentado um peso maior para a função de ajuste dos teores. Deste modo, a função objetivo passou a ser:

$$\text{Min } Z = S_1(a, b, \gamma) + S_2(a, b, \gamma) + \zeta S_3(a, b, \gamma) + \eta S_4(a, b, \gamma) \quad (\text{Eq. 3. 25})$$

Os valores dos pesos ζ e η irão depender do formato em que os percentuais da distribuição f_m são expressos, se como valores de 0 a 100 ou de 0 a 1. A utilização destes pesos é importante porque eles permitem que os valores dos quatro fatores estejam equilibrados e sejam da mesma ordem de grandeza. Às vezes, as diferenças existentes entre classes de liberação fazem com que S_1 e S_2 sejam muito maiores, em valores, que S_3 ou S_4 . Quando isto ocorre, o método de mínimos quadrados irá atuar muito mais para que o ajuste da curva seja mais próximo dos dados de liberação, priorizando a minimização de S_1 e S_2 , do que garantir que os teores sejam próximos do teor do balanço, o que é resultado de atuar sobre S_3 e S_4 . Com a utilização dos pesos para garantir que os quatro fatores sejam da mesma ordem de grandeza, a minimização torna-se mais adequada.

O processo de minimização é realizado pela planilha de cálculo, no caso, o Solver do Excel, e determina os valores ajustados de a , b e γ . A partir destes parâmetros calculados, os valores ajustados das distribuições simples e acumulada das classes de liberação são determinados.

A descrição deste procedimento é longa e, por isto, o método pode parecer excessivamente complexo. A apresentação dos resultados retomará o procedimento com uma fração do concentrado rougher visando facilitar o entendimento. Será possível verificar que o processo não é complexo, apenas é trabalhoso.

Etapa 6 - Balanço dos dados de liberação

Uma vez que os dados de ajuste beta tenham sido obtidos para cada fluxo, é possível realizar o balanço por classe de liberação. Como os programas computacionais de

reconciliação de balanços não incluem este nível de balanço diretamente, o cálculo deste balanço é distinto. O último dado balanceado por um software com processos de minimização é o da fração granulométrica. Assim, é o dado mais confiável. O ajuste beta faz com que os valores de teor calculados a partir das classes de liberação se aproximem do teor do balanço granulométrico. Entretanto, para fechamento do balanço, é necessário que estes teores sejam *iguais*. Além disto, cada classe de liberação tem de ter um teor médio e uma distribuição simples que esteja em regime, ou seja, cada classe também tem de estar com o balanço fechado entre os produtos. A figura 3.17 apresenta estas restrições.

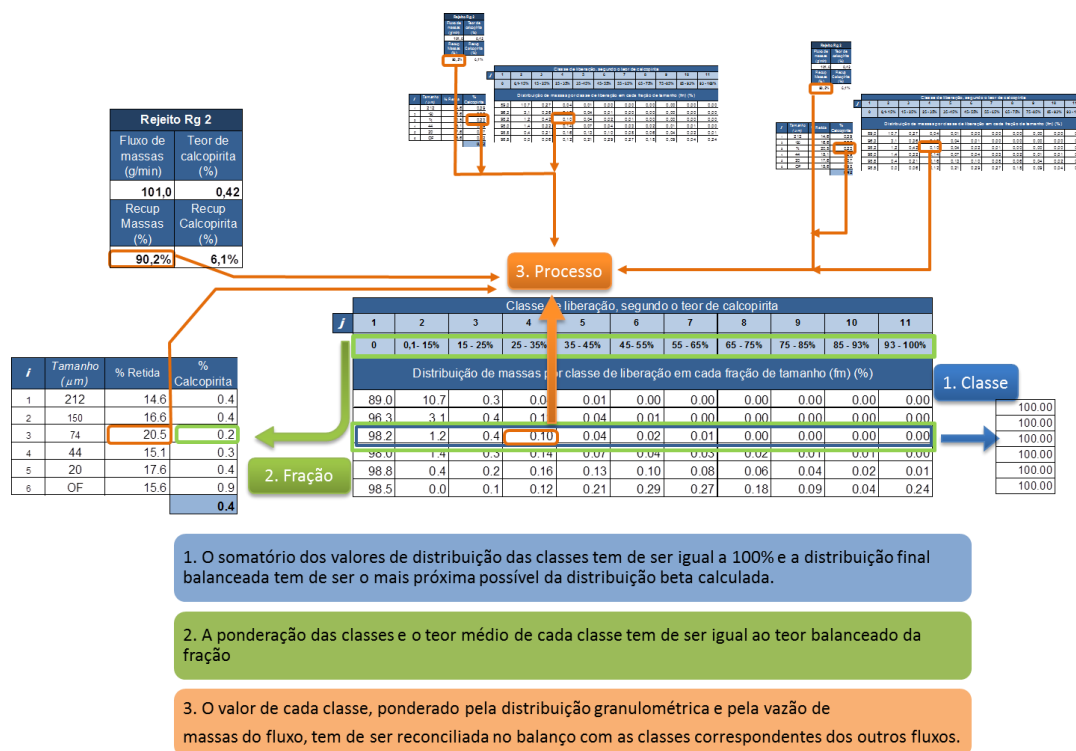


Figura 3.17 – Restrições do balanço por classe de liberação

Considerando estas restrições, existem duas possibilidades para realizar este balanço:

1. Realizar o balanço através de planilhas de cálculo, ajustando os dados obtidos na curva beta de modo a alcançar a reconciliação perfeita ou
2. Utilizar o programa de reconciliação para realizar *um balanço completo para cada fração granulométrica*, como se a massa de uma fração, já balanceada, correspondesse à massa total da alimentação do beneficiamento. Neste sentido, é como se a massa da fração, que corresponde a um subnível de análise, fosse a massa inicial de alimentação da flotação e correspondesse ao primeiro nível do

balanço. Utilizando este artifício, o programa passa a ter espaço para introduzir as classes de liberação como um subnível de análise.

O resultado final do produto de um fluxo é ilustrado na tabela 3.2, que mostra todos os dados balanceados e de acordo com as restrições físicas.

Tabela 3.2– Dados balanceados globais, por fração granulométrica e de liberação de um fluxo de rejeito rougher 2

Dados Balanceados														
Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)													
101.0	0.4													
Recup Massa (%)	Recup Cpy (%)													
90.2%	6.1%													
			Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											Total
			0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
Tamanho (um)	%Retida	Teor Cpy (%)	Distribuição % em massa por classe de liberação											
212	14.6	0.4	89.0	10.7	0.3	0.0	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
150	16.6	0.4	96.3	3.1	0.4	0.1	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
74	20.5	0.2	98.2	1.2	0.4	0.1	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
44	15.1	0.3	98.0	1.4	0.3	0.1	0.07	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	100.0
20	17.6	0.4	98.8	0.4	0.2	0.2	0.13	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	100.0
<20	15.6	0.9	98.5	0.0	0.1	0.1	0.21	0.29	0.27	0.18	0.09	0.04	0.24	100.0
	100.0	0.4												

A partir destes balanços, é possível avaliar o processo nos diversos níveis e explorar os modelos correspondentes.

Capítulo 4 - Revisão Bibliográfica – Parte 2

Modelamento de Flotação, Modelo dos Compartimentos e Modelos Paralelos

Historicamente, o primeiro modelo de flotação cinético foi proposto por Zuniga em 1935 (Brozek & Mlynarczykowska, 2007) e considerava que a interação partícula (A) - bolha (B) seria análoga a uma reação química $A + B \rightarrow AB$. (Mendez et al., 2009). Seguindo este mecanismo, a concentração do mineral C_A decresce com o tempo t em relação à concentração de bolhas C_B e uma constante k , seguindo a equação 4.1:

$$\frac{-dC_A}{dt} = k C_B C_A \quad (\text{Eq. 4. 1})$$

Quando a concentração de bolhas é constante, C_B pode ser incorporado na constante k simplificando a equação 4.1 para:

$$\frac{-dC_A}{dt} = k C_A \quad (\text{Eq. 4. 2})$$

Onde:

C_A = Concentração do mineral A

t = tempo de flotação

k = constante cinética ou *velocidade de flotação* ou taxa de flotação

Utilizando as condições limite

$$C = C_0 \quad \text{no tempo} \quad t = 0$$

$$C = C_t \quad \text{no tempo} \quad t = t$$

Tem-se

$$C_t = C_0 \exp(-kt) \quad (\text{Eq. 4. 3})$$

E como a recuperação no tempo t , R_t , corresponde a:

$$R_t = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \quad (\text{Eq. 4. 4})$$

Então:

$$R_t = 1 - \exp(-kt) \quad (\text{Eq. 4. 5})$$

No regime tubular, o cálculo de recuperação pode ser feito a partir da equação 4.5, utilizando-se o tempo médio τ :

$$R = 1 - \exp(-k\tau) \quad \text{regime tubular} \quad (\text{Eq. 4. 6})$$

Para um reator sob regime de mistura perfeita, a recuperação é dada pela equação 4.7:

$$R = \frac{k\tau}{1+k\tau} \quad \text{regime de mistura perfeita} \quad (\text{Eq. 4. 7})$$

As equações 4.6 e 4.7 formaram a base dos modelos cinéticos. Nelas, k corresponde à velocidade de flotação da partícula indicando a maior ou menor propensão que o minério apresenta à flotação e, por isto, k é o principal parâmetro do modelo.

Este modelo cinético básico apresenta bom ajuste para dados em bancada e em escala industrial e permite obter a velocidade de flotação k do minério a partir do valor de recuperação e do tempo de residência nas células.

A grande limitação deste modelo reside no fato de não incorporar, explicitamente, características do minério, condições de flotação e do ambiente químico, o que não possibilita a simulação em condições distintas das que foram utilizadas quando da determinação do parâmetro k . É interessante notar que a própria definição do modelo já assume que a concentração de bolhas é constante, apesar da quantidade de ar ser uma das condições fisicamente mais relevantes, frequentemente alterada na condução do processo.

As limitações do modelo foram logo reconhecidas. Schuhmann (1942) já mostrava que o comportamento cinético de minerais durante a flotação dependia grandemente das condições de processo e do minério. Desde então, diversos estudos demonstraram que o desempenho no processo depende do tamanho de partícula (Tomlinson and Fleming, 1963; Trahar, 1981; Crawford and Ralston, 1988), da composição do minério, particularmente a liberação (Lynch et al., 1981; Sutherland, 1989; Barbery, 1991) e de fatores que influenciam a hidrofobicidade mineral como o grau de oxidação e a densidade de adsorção do coletor (Klassen and Mokrousov, 1963; Smart et al., 2003), além da hidrodinâmica.

Nas últimas décadas, diversas abordagens de modelamento surgiram tendo como base o modelo cinético, alterando-o ou ajustando-o para incluir estas condições, bem como novas abordagens, de cunho empírico ou de caráter mais teórico /fenomenológico foram propostas e avaliadas.

Quanto aos modelos de base cinética, várias formas foram utilizadas para melhorar o ajuste e a representatividade das equações originais ou para incluir condições de processo

ou características do minério, muitas vezes criando uma nova estrutura de modelamento. De um modo geral, estas alterações incluem:

- a incorporação de termos para melhorar o ajuste nas equações 4.6 e 4.7, como a recuperação máxima $R_{\max}$, equivalente à condição limite de flotação no tempo infinito;
- a divisão da flotação em compartimentos (polpa e espuma, por exemplo) com aplicação do modelo ou com o estabelecimento de modelos distintos separadamente em cada compartimento. (Flint, 1974; Harris, 1978; Lynch et al., 1981);
- a caracterização do minério e produtos de processo por fração granulométrica e aplicação do modelo por fração granulométrica (Trahar, 1981);
- a caracterização do minério por fração granulométrica e por classe de liberação em cada fração, com avaliação por classes (King, 1976);
- a distribuição da *constante* cinética de flotação em uma série de componentes ou através de uma distribuição contínua. O minério é entendido como sendo composto de frações que apresentam velocidades de flotação distintas. Estas frações podem ser distribuídas de modo contínuo (Loveday, 1966; Huber-Panu et al., 1976; Klimpel, 1982; Dobby and Savassi, 2005) ou discreto, em um número fixo de componentes de flotação (Kelsall, 1961; Klimpel, 1982; Alexander and Morrison, 1998), como, por exemplo, componente de flotação rápida, flotação lenta e sem flotação;
- Uma combinação de abordagens descritas acima, incluindo modelos distintos para as diferentes fases (ou compartimentos) da flotação (Sutherland, 1989; Savassi, 2005; Amenluxen e Amenluxen, 2009; Welsby et al., 2010).

Também a partir de uma perspectiva mais acadêmica e voltada para a representação matemática de fenômenos fundamentais, diversos modelos foram desenvolvidos. (Mao and Yoon 1997; King, 2001; Pyke, et al. 2003). Entretanto, por apresentarem um grande número de parâmetros, muitas vezes de difícil mensuração, estes modelos tornam-se de pouco uso prático.

O modelo dos compartimentos, proposto por Savassi (2005) tem como vantagem o fato de considerar os principais fenômenos da flotação na polpa e na espuma, incorporando e relacionando diversos parâmetros dos subprocessos envolvidos, o que permite

flexibilidade na simulação para diversas condições de processo e de características de minério. Embora haja uma quantidade considerável de informação e parâmetros a ser obtida, todas as medidas são factíveis ou podem ser estimadas com razoável precisão seguindo métodos consolidados na literatura. Este modelo tem encontrado boa aceitação, tendo sido utilizado ou referenciado em diversos trabalhos (Yianatos, 2007; Mendez et al., 2009; Welsby et al., 2010).

4.1 Modelo dos Compartimentos

O modelo dos compartimentos é estruturado a partir de uma equação geral que relaciona a recuperação mineral global com os principais fenômenos de transferência de massas da flotação, representados por cinco parâmetros físicos: a recuperação na espuma, a cinética de flotação na região de coleta, o tempo de residência na região de coleta, a recuperação de água e o arraste mecânico. Para representar e determinar cada um destes parâmetros, são utilizados outros modelos matemáticos de acordo com sua adequação à realidade operacional que se deseja avaliar. Dito de outro modo, o modelo dos compartimentos corresponde a uma estrutura base, um eixo que correlaciona cinco fenômenos essenciais sendo que cada um deles pode ser representado por um modelo distinto.

No modelo dos compartimentos, são relevantes três grandes subdivisões realizadas para melhor descrever o processo e sua relação com o minério:

1. O minério e os principais produtos são analisados granulometricamente e cada fração é analisada por grau de liberação. Assim, o minério e cada um dos produtos são representados pelo respectivo somatório destas classes de tamanho-liberação.
2. O processo de flotação é considerado a partir dos principais mecanismos de transferência de massas, sendo que a flotação real, o arraste mecânico e a recuperação na espuma são os mecanismos que mais impactam a qualidade do

material flotado e, portanto, definem o processo. Este, por sua vez, é representado pelas equações matemáticas que consolidam estas transferências de massas.

3. Estes mecanismos de transferência ocorrem em duas fases existentes em cada célula: polpa e espuma.

4.1.1 Mecanismos de transferência de massas

O entendimento da flotação como um conjunto de subprocessos é bastante antigo. Sutherland (1942) já propunha modelos que incluíam a probabilidade de desprendimento na espuma. Estudos de subprocessos específicos são amplamente descritos por Gaudin (1939, 1957) e Klassen and Mokrousov (1963). Diversos modelos complexos de cunho fundamental foram desenvolvidos representando mecanismos específicos, utilizando parâmetros detalhados. Entretanto, a utilização de modelos envolvendo conjuntos de fórmulas simplificadas que representam e integram mecanismos de transferências de massas é relativamente recente, tendo sido mais desenvolvida a partir de 1990. Em linhas gerais, *e sem entrar no mérito das interações químicas*, a flotação pode ser entendida através dos seguintes mecanismos de transporte:

1. *Adesão* ou *Coleta*, que se refere à adesão entre bolhas e partículas hidrofóbicas na região de polpa. A ela, segue-se o movimento em direção à região de espuma.
2. *Arraste mecânico* de partículas suspensas na região de polpa independentemente da hidrofobicidade. O arraste mecânico (entrainment), como o próprio nome indica, refere-se à transferência de partículas da polpa para o flotado, de modo não seletivo, ocasionado pelo arraste de polpa mineral pelos interstícios das bolhas, enquanto estas se movem através da espuma.
3. *Desprendimento* de parte das partículas na região de espuma devido à coalescência e/ou colapso das bolhas (as partículas desprendidas ficam suspensas entre as bolhas juntamente com as transportadas por arraste mecânico).
4. *Drenagem* de água e de parte das partículas suspensas entre as bolhas na região de espuma.

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

5. Transporte de partículas aderidas às bolhas a partir da espuma para o flotado.
6. Transporte de água e partículas suspensas entre as bolhas para o flotado (inclui partículas desprendidas). A figura 4.1 ilustra estes fenômenos.

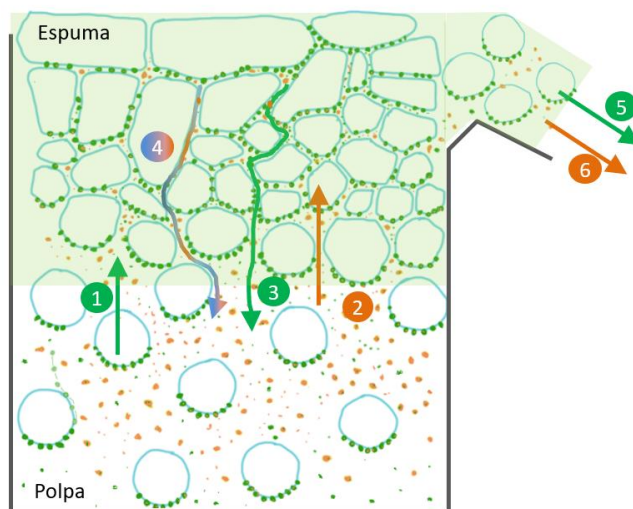


Figura 4.1 – Transferência de massa em uma célula de flotação (adaptado de Laplante et al, 1989).

Há duas grandes resultantes destes mecanismos para as partículas aderidas ou arrastadas: seguir para o flotado/concentrado ou retornar para a polpa e então para o afundado/rejeito.

Consideremos, primeiramente, apenas as *partículas aderidas*. Entre as partículas hidrofóbicas que adentram a célula, parte irá aderir às bolhas na região de coleta, outra parte passará diretamente ao afundado. Há aqui uma primeira recuperação, a recuperação de partículas na região de coleta, R_c , definida como a fração efetivamente aderida e coletada que atinge a espuma em relação à quantidade de partículas hidrofóbicas na alimentação.

Destas partículas recuperadas na região de coleta que pertencem a R_c e que entraram na espuma, uma parte passará por desprendimento ainda na região de espuma e retornará para a polpa. A maior proporção, no entanto, seguirá para o transbordo de flotado. A razão entre as partículas aderidas às bolhas que transbordam ao flotado em relação às partículas aderidas que entram na espuma é a recuperação na espuma, R_f .

A recuperação final *de partículas aderidas*, R_{att} , é a resultante da combinação destas duas recuperações, R_c e R_f em relação à alimentação fresca e é definida como a recuperação de partículas originalmente aderidas que transbordam para o flotado em relação a partículas hidrofóbicas da alimentação.

De modo semelhante, define-se a recuperação *de partículas suspensas*, R_{sus} , que inclui tanto as partículas originalmente suspensas e arrastadas entre as bolhas como as partículas desprendidas que também são levadas ao flotado por arraste mecânico, independentemente da hidrofobicidade.

Assim, os mecanismos de transporte podem ser descritos a partir dos conceitos de recuperações.

A equação geral do modelo dos compartimentos consolida estes fenômenos. Aqui, apenas os conceitos fundamentais para o entendimento da fórmula serão apresentados.

A recuperação final, R , é composta pela recuperação de partículas aderidas às bolhas na região de polpa que permanecem aderidas através da camada espuma até transbordarem ao flotado, R_{att} , e pela recuperação de partículas suspensas, R_{sus} .

A adesão é o primeiro fenômeno e ocorre quase totalmente na região de coleta. O arraste é posterior, iniciando na interface com a região de espuma e refere-se a partículas suspensas e não aderidas. Tanto a recuperação de partículas suspensas quanto a recuperação de partículas aderidas irão depender das condições na espuma, mas em termos de recuperação global, da alimentação para o flotado, pode-se afirmar que:

$$R = R_{att} + (1 - R_{att}) R_{sus} \quad (Eq. 4. 8)$$

Que também pode ser expressa por:

$$R = R_{att}(1 - R_{sus}) + R_{sus} \quad (Eq. 4. 9)$$

Então, para considerar separadamente os efeitos de subprocessos na polpa e na espuma é necessário identificar como as duas recuperações são afetadas em cada região. Finch e Dobby (1990) descreveram estas recuperações interligadas em um balanço na célula considerando-se os volumes de polpa e espuma. Seja R_c a recuperação de partículas

hidrofóbicas na polpa exclusivamente por adesão e R_f a recuperação destas partículas na região de espuma, reportando ao flotado. O diagrama da figura 4.2 apresenta a relação entre os fluxos e estas recuperações na polpa e na espuma.

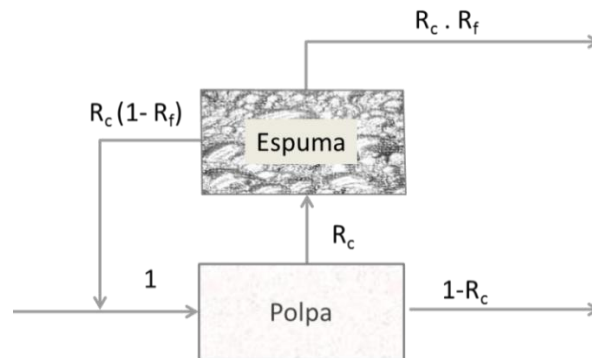


Figura 4.2 – Diagrama de recuperações nas regiões de polpa e espuma. (Adaptado de Finch e Dobby, 1990)

A partir do balanço, a recuperação de partículas aderidas, R_{att} , pode ser expressa por:

$$R_{att} = \frac{R_C \cdot R_f}{R_C \cdot R_f + 1 - R_C} \quad (Eq. 4. 10)$$

E, deste modo, consolidando as equações 4.9 e 4.10, a recuperação global é expressa por:

$$R = \frac{R_C \cdot R_f (1 - R_{sus})}{R_C \cdot R_f + 1 - R_C} + R_{sus} \quad (Eq. 4. 11)$$

Numa dedução simplificada, esta relação pode ser tomada como base para a equação do modelo dos compartimentos, que detalha um pouco mais a recuperação de partículas suspensas R_{sus} e a recuperação de partículas aderidas na região de coleta R_c .

A recuperação de partículas suspensas R_{sus} depende do grau de arraste mecânico gerado no processo (ENT) que pode ser quantificado pela seguinte relação:

$$ENT = \frac{\omega_{sus}^{con}}{\omega_{sus}^{qz}} \quad (Eq. 4. 12)$$

Onde ω_{sus}^{con} = massa de ganga livre por massa de água no flotado

e ω_{sus}^{qz} = massa de ganga livre por massa de água na região quiescente de polpa, que é a porção de polpa menos turbulenta, logo abaixo da interface com a espuma

Para expressar a recuperação de partículas suspensas em função do grau de arraste, novamente, é considerado o balanço de massas, em que, por definição, R_{sus} é dado pela massa de partículas suspensas que reportam ao flotado sobre massa de partículas suspensas na alimentação. Seja R_w a recuperação de água. A recuperação R_{sus} pode, então, ser calculada a partir de:

$$R_{sus} = \frac{\omega_{sus}^{qz}}{\omega_{sus}^{feed}} \cdot ENT \cdot R_w \quad (Eq. 4. 13)$$

Onde ω_{sus}^{feed} = massa de ganga livre por massa de água na alimentação.

R_w = recuperação de água

A proporção de massa de ganga livre por massa de água na região quiescente ω^{qz} é mensurável, mas sua avaliação e associação com condições de processos não é trivial, o que dificulta consideravelmente seu uso para propósitos de simulação. No entanto, em uma célula convencional de flotação, pode-se assumir confiavelmente que o regime é de mistura perfeita para água e partículas finas tanto na região de coleta como na região quiescente. Assim, a composição da polpa é igual à composição do afundado, que no caso da flotação direta corresponde ao rejeito. Deste modo:

$$\omega_{sus}^{qz} = \omega_{sus}^{tail} \quad (Eq. 4. 14)$$

Onde ω_{sus}^{tail} = massa de ganga livre por massa de água no afundado. Portanto:

$$R_{sus} = \frac{\omega_{sus}^{tail}}{\omega_{sus}^{feed}} \cdot ENT \cdot R_w \quad (Eq. 4. 15)$$

Considerando as definições das razões ω (*razão entre massa de partículas e de água*) para o afundado e alimentação, *para a flotação direta*, esta expressão da recuperação de partículas suspensas pode ser algebricamente relacionada à recuperação global sendo reescrita como:

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

$$R_{sus} = \frac{1 - R}{1 - R_w} \cdot ENT \cdot R_w \quad (Eq. 4. 16)$$

Quanto à recuperação de partículas aderidas na polpa, assumindo que, nas proximidades do impelidor, o regime numa célula de flotação convencional é de mistura perfeita e que o processo de adesão ocorre segundo uma cinética de primeira ordem, então a relação é similar à equação 4.7, o que resulta em:

$$R_c = \frac{k_c \cdot \tau_c}{k_c \cdot \tau_c + 1} \quad (Eq. 4. 17)$$

Cabe notar um detalhe. Na definição do modelo dos compartimentos, a região efetiva de coleta é, por premissa, uma região de volume arbitrário e constante nas proximidades do impelidor. Em outras palavras, a zona de coleta está contida na zona de polpa, mas não corresponderia a todo o volume da polpa. Considera-se que, hidrodinamicamente, existe uma região quiescente entre a zona de coleta e a espuma. Nesta zona quiescente, por definição, não ocorreria coleta e a região de coleta efetiva teria um volume fixo em torno do impelidor. Isto faz com que o tempo de residência seja calculado segundo este volume fixo, pré definido e constante entre as células. Seja então

$$R_c^* = \frac{k_c^* \cdot \tau_c^*}{k_c^* \cdot \tau_c^* + 1} \quad (Eq. 4. 18)$$

A diferença entre esta relação 4.18 e a equação 4.17 é que a constante cinética k_c^* da equação 4.18, por definição, refere-se exclusivamente à adesão bolha partícula na região de coleta pré-definida e parte do princípio que a adesão não ocorre em toda a polpa, somente numa porção dela. Na equação 4.17, todo o volume de polpa corresponderia à zona de coleta. De modo análogo, ambas 4.17 e 4.18 diferem da equação 4.7, em que todo o volume da célula– polpa e espuma – está incluído na definição cinética de k , τ e R . A vantagem de se usar a equação 4.17 ou 4.18 está em que, por ser exclusiva da região de coleta, k_c aproxima-se mais da realidade da cinética da adesão bolha-partícula e pode ser relacionada a outros parâmetros diretamente ligados a este fenômeno.

Por fim, incorporando as equações de R_c e R_{sus} (eq. 4.16 e 4.17 ou 4.18) à equação da recuperação global R (eq. 4.11), tem-se a fórmula geral do modelo dos compartimentos, consolidando as relações de transferência de massas, dada por:

$$R = \frac{k_c^* \cdot \tau_c^* \cdot R_f \cdot (1 - R_w) + ENT \cdot R_w}{(1 + k_c^* \cdot \tau_c^* \cdot R_f) \cdot (1 - R_w) + ENT \cdot R_w} \quad (Eq. 4. 19)$$

Os parâmetros de recuperação na espuma R_f , de arraste mecânico, ENT , e de recuperação de água, R_w , são associados a modelos específicos, que relacionam estas variáveis a condições de processo e ao minério. Deste modo, existe flexibilidade em se utilizar modelos paralelos específicos que melhor se ajustem às condições do processo sendo avaliado. Neste trabalho, um ou mais modelos paralelos para cada variável serão avaliados.

O valor da velocidade de flotação na região de coleta k_c é obtido por retro-cálculo, ou seja, obtendo-se os valores dos parâmetros e de posse da recuperação global em ensaios de calibração, o valor de k_c para cada classe de tamanho-liberação pode ser obtido a partir da equação global, definindo assim a flotabilidade de cada classe, o que permite a simulação em outras condições.

Com este modelo dos compartimentos como base, existe flexibilidade em se utilizar modelos paralelos específicos que melhor se ajustem às condições do processo sendo avaliado.

O valor da *velocidade* de flotação na região de coleta k_c é obtido por retro-cálculo, ou seja, obtendo-se os valores dos parâmetros e de posse da recuperação global em ensaios de calibração, o valor de k_c para cada classe de tamanho-liberação pode ser obtido a partir da equação global, definindo assim a flotabilidade de cada classe, o que permite a simulação em outras condições.

O modelo dos compartimentos pode ser utilizado como modelo base para o minério como um todo, para frações de tamanho ou para classes de liberação. No entanto, é importante verificar se os modelos paralelos utilizados são aplicáveis nestes mesmos níveis. Deve ser observado, por exemplo, que a avaliação de arraste mecânico, ENT , sempre que este

fator for relevante, deve ser feita por fração granulométrica. Caso o modelo seja utilizado para o minério como um todo, o fator de arraste deve ser calculado a partir dos dados obtidos por fração granulométrica.

Desta forma, para utilização do modelo, é necessário realizar ensaios de calibração em condições distintas, que permitam definir e relacionar as variáveis de transferência de massas ao conjunto de condições utilizadas na flotação, bem como calcular as constantes e parâmetros de cada equação relativa aos subprocessos de transferências de massas. Nestes ensaios de calibração, o minério e produtos são amostrados e caracterizados e são realizadas as medidas relevantes para a avaliação de cada um destes subprocessos. São feitos, sequencialmente, o balanço de massas global, o balanço de massas por fração granulométrica e o balanço de massas por classe de liberação. Os valores de teor e recuperação global por classe aliados aos valores das demais condições permitem definir os parâmetros das equações de transferências de massas. Uma vez que as equações estejam parametrizadas, o modelo está pronto para uso em simulação, em condições distintas das testadas originalmente.

Os modelos auxiliares e seus parâmetros são mais detalhados nos próximos itens.

4.2 Modelos Paralelos

4.2.1 Arraste Mecânico – Descrição Geral

Arraste mecânico (entrainment) é um processo que ocorre simultaneamente com a flotação efetiva e relaciona-se à transferência de partículas da polpa para o flotado, de modo não seletivo, devido à suspensão destas partículas no meio aquoso aprisionado entre as bolhas. Enquanto a flotação real (true flotation) é o processo pelo qual partículas hidrofóbicas seguem a transferência de massas do ar, o arraste mecânico é aquele em que partículas suspensas seguem a transferência de massas da água. (Trahar, 1981).

Uma vez que tanto a ganga quanto o mineral de interesse estão sujeitos a este fenômeno, o arraste mecânico provoca perda de seletividade no flotado, com redução do teor, no caso de flotação direta. Por outro lado, no caso de flotação reversa, o arraste mecânico causa redução na recuperação das partículas valiosas.

Muitos estudos foram conduzidos na tentativa de minimizar os efeitos deste mecanismo de modo a elevar o teor do concentrado (flotação direta) ou a elevar a recuperação do afundado (flotação reversa). O trabalho de pesquisa pioneiro nesta área foi realizado por Jowett (1966) e Johnson et al (1974). As características do arraste de ganga foram descritas em detalhes tanto em bancada como em ensaios contínuos. O tema foi revisto por Lynch et al(1981), Trahar (1981), Subrahmanyam and Forssberg (1988 b), Smith e Warren(1989), Savassi (1998) e Zheng (2006).

A teoria predominantemente aceita para descrever este mecanismo de arraste é a apresentada por Smith e Warren (1989). Segundo esta teoria, o arraste ocorre de acordo com três subprocessos, ilustrados na figura 4.3.

- a) ascensão de bolhas de ar em direção à região de espuma,
- b) aprisionamento de água e partículas suspensas nos interstícios que se formam na interface entre as regiões de polpa e espuma,
- c) formação de uma nova interface e drenagem de água e partículas suspensas de volta para a polpa

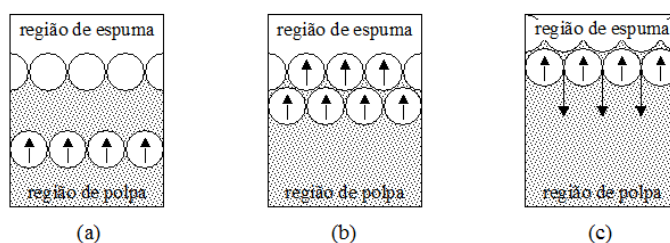


Figura 4.3- Etapas do arraste mecânico em uma célula industrial de flotação (adaptado de Smith e Warren, 1989).

Por este mecanismo, observa-se que a quantidade de partículas suspensas que efetivamente segue para o flotado depende tanto da chegada de nova superfície de espuma quanto da drenagem. Estes dois fluxos determinam o balanço para o processo de arraste mecânico. (Moys, 1978).

O arraste mecânico apresenta forte relação com a recuperação de água. No caso de flotação direta, a concentração de ganga livre no concentrado é proporcional à concentração de ganga livre suspensa na região de polpa. Para a flotação reversa, a

concentração de mineral valioso hidrofílico liberado na espuma é proporcional à concentração de mineral valioso hidrofílico liberado na polpa.

Esta proporcionalidade é a relação principal para definição do arraste e é condicionada pela percentagem de sólidos na polpa, a distribuição granulométrica na alimentação, a estrutura da espuma, o tempo de residência na espuma e a densidade do mineral. (Jowett 1966)

Quanto maior a percentagem de sólidos, maior o efeito do arraste mecânico, uma vez que volume de polpa arrastado contém maior número de partículas.

Em relação à granulometria, o grau de arraste mecânico tende a decrescer significativamente com o aumento do tamanho de partícula. Este efeito é relacionado à drenagem de água e partículas suspensas nos interstícios entre as bolhas na região de espuma. As partículas ultrafinas tendem a ser drenadas com a mesma velocidade da água, enquanto que as partículas grossas tendem a ser drenadas mais rapidamente devido à sua maior velocidade de sedimentação. Partículas muito maiores do que 50 μm não são em geral recuperadas por arraste mecânico (Smith e Warren, 1989). Deste modo, os estudos sobre arraste mecânico devem ser conduzidos por fração granulométrica.

Alguns trabalhos demonstraram certo efeito da densidade do mineral sobre o arraste (Bisshop e White, 1976; Maachar e Dobby, 1992). Quanto maior a densidade, menor o arraste resultante. Este comportamento é atribuído à maior facilidade de sedimentação das partículas mais densas, o que lhes favorece a drenagem e reduz a transferência para o flotado.

A recuperação de sólidos por arraste também decresce com o aumento da profundidade da espuma e com a redução da vazão de ar, já que estes dois fatores reduzem a recuperação de água na espuma. Deste modo, a recuperação por arraste decresce com o aumento do tempo de residência do ar na espuma.

A estrutura da espuma também afeta a recuperação por arraste. Esta estrutura é afetada por uma série de fatores como tipo e dosagem de reagentes, vazão de ar e condições hidrodinâmicas da célula. Espumas densas e com bolhas pequenas tendem a favorecer o

aumento do grau de arraste devido à menor coalescência e menor velocidade de drenagem.

4.2.2 Arraste Mecânico – Modelamento

Em um dos primeiros trabalhos de modelamento de arraste, Johnson et al. (1974) investigaram o comportamento da ganga não sulfetada na flotação de calcopirita. Para cada fração, foi definido um fator de classificação (CF), posteriormente renomeado como grau de arraste (ENT, de entrainment) como mostra a equação 4.20:

$$ENT = \frac{(\text{massa de ganga livre por massa de água})_{\text{Concentrado}}}{(\text{massa de ganga livre por massa de água})_{\text{Polpa}}} \quad (\text{Eq. 4. 20})$$

Esta equação é equivalente à equação 4.12:

$$ENT = \frac{\omega_{sus}^{con}}{\omega_{sus}^{qz}} \quad (\text{Eq. 4. 21})$$

onde ω representa a concentração de ganga em unidade de massa por volume de água.

Em termos práticos, o grau de arraste pode ser obtido de acordo com a equação 4.20, através da determinação da quantidade, na polpa e na espuma, de um traçador mineral. Este traçador é uma espécie completamente liberada e não flotável, que pode ser tomada dentre os minerais já existentes no sistema. Um exemplo é a sílica em minérios de cobre. O valor determinado com os dados do traçador é admitido como o grau de arraste também para as demais espécies presentes no sistema, num dado intervalo de tamanho i . Esta abordagem contém a consideração de que o grau de arraste não depende do tipo de mineral.

A equação 4.21 apresenta o modo de cálculo da massa de ganga livre do próprio minério, onde ms_i é a fração granulométrica e $f_{ms\ i, 1}$ é a distribuição de massas na classe de liberação de ganga (classe $j=1$)

$$massa\ de\ ganga\ livre = \sum_{i=1}^{ng} ms_i^{**} \cdot f_{ms\ i,1}^{***} \quad (Eq. 4. 22)$$

Diversos modelos foram propostos para o arraste mecânico. Entre os modelos fenomenológicos destacam-se o de Bisshop and White (1976), o de Savassi et al (1998) e o de Yianatos (2010).

A proposta de Savassi et al.(1998) corresponde a uma curva empírica de partição, a qual descreve o efeito do diâmetro, x_i , e da densidade, δ_j , das partículas de uma determinada classe de tamanho-liberação sobre o grau de arraste mecânico:

$$ENT_{i,j} = \frac{1}{\cosh(A)} \quad (Eq. 4. 23)$$

$$A = 2.292 \cdot \left(x_i / \xi_j \right)^B \quad (Eq. 4. 24)$$

$$B = 1 - \frac{\ln(\delta_j)}{\exp\left(x_i / \xi_j \right)} \quad (Eq. 4. 25)$$

A forma da curva empírica de partição é ilustrada na Figura 4.4.

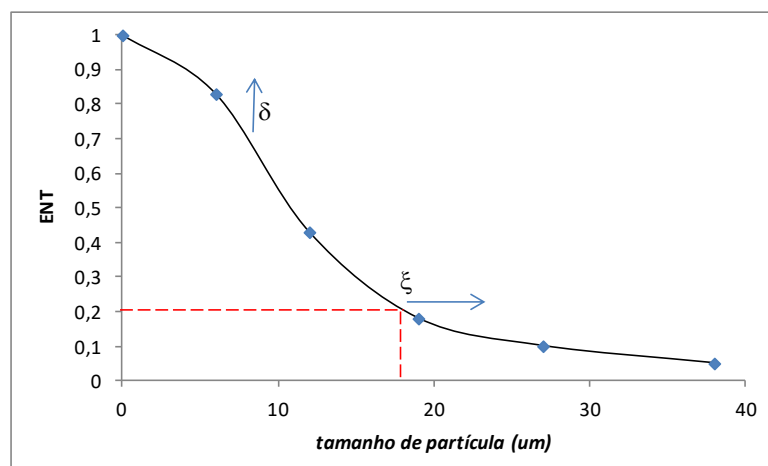


Figura 4.4- A forma da curva empírica para arraste mecânico.

O parâmetro ξ representa o tamanho de partícula para o qual o grau de arraste mecânico é igual a 20 %, enquanto que o parâmetro δ indica a facilidade de drenagem da camada de espuma, ou seja, um indicativo da "porosidade" da camada de espuma. Um aumento na vazão de ar, ou qualquer outra modificação que venha a causar maior grau de arraste mecânico, é indicada por um aumento no valor de ξ . Por outro lado, um aumento no valor de δ indica uma diminuição na concentração de espumante, ou qualquer outra modificação que venha a causar maior drenagem na região de espuma (Savassi, 2000a). Os parâmetros A e B são apenas variáveis auxiliares para facilitar a expressão da fórmula matemática e não possuem significado específico.

Deve ser lembrado que a estimativa do grau de arraste mecânico é baseada em uma espécie hidrofílica a qual é utilizada como um traçador. Em geral, os dados de liberação contem uma espécie ideal para ser utilizada como traçador, ou seja, as partículas liberadas de ganga, equivalente à classe que não contém mineral minério flotável (classe 1). O ajuste da curva empírica de partição para o traçador permite estimar o efeito das condições operacionais sobre o grau de arraste mecânico de diferentes classes de partículas. Assumindo-se que partículas de mesma massa tem a mesma velocidade de drenagem na espuma e, portanto, apresentam o mesmo grau de arraste mecânico, as seguintes equações podem ser utilizadas para descrever o efeito da densidade (ρ) da partícula, após o ajuste da curva empírica de partição para o traçador:

$$\xi_j = \xi_1 \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_j} \right)^{1/3} \quad (\text{Eq. 4. 26})$$

$$\delta_j = \delta_1 \quad (\text{Eq. 4. 27})$$

O modelo de Bisshop and White pode ser descrito pelas seguintes equações:

$$\text{ENT} = \frac{1 + \alpha \cdot \tau_f}{1 + \epsilon_i \cdot \tau_f} \quad (\text{Eq. 4. 28})$$

$$\alpha = \kappa_1 \cdot (\rho_m - \rho_p) \quad (\text{Eq. 4. 29})$$

$$\epsilon_i = \alpha \cdot \exp(\kappa_2 \cdot d_i) \quad (\text{Eq. 4. 30})$$

Onde α e ϵ são os parâmetros de drenagem de água e partículas arrastadas, respectivamente, τ_f é o tempo de residência na espuma estimado a partir do volume de espuma dividido pelo fluxo de flotado, ρ_m e ρ_p são a densidade das partículas minerais e da polpa respectivamente, d_i é o diâmetro equivalente de sedimentação das partículas arrastadas e κ_1 e κ_2 são constantes. Este modelo apresenta um bom ajuste para partículas muito finas, abaixo de 50 μm , mas o ajuste torna-se menos eficaz para partículas acima deste tamanho.

Yianatos e Contreras (2010) propuseram um novo modelo, que equivale à seguinte curva de partição:

$$\text{ENT} = \exp \left(-0,693 \left(\frac{d_i}{\delta} \right)^\varphi \right) \quad (\text{Eq. 4. 31})$$

Onde d_i é o tamanho de partícula na i -ésima classe, o parâmetro δ corresponde ao diâmetro médio para o qual o fator de arraste é igual a 0,5 e φ é o parâmetro de drenagem, que depende das características do mineral e das condições de operação da célula.

(Yianatos e Contreras, 2010) O modelo foi calibrado industrialmente e apresenta bom ajuste para uma faixa ampla de tamanhos.

Esta equação, em princípio, refere-se à ganga livre. Então, em relação ao uso desta equação e de parâmetros fixos para todas as classes de liberação, há duas possibilidades:

1. A equação pode ser assumida como representativa de qualquer classe de liberação ou
2. pode-se estimar o efeito do aumento de densidade sobre os parâmetros da fórmula.

Por analogia com o modelo de Savassi e equações 4.25 e 4.26, considerando-se que partículas de mesma massa tem a mesma velocidade de drenagem na espuma e, portanto, apresentam o mesmo grau de arraste mecânico, o parâmetro delta poderia ser corrigido utilizando-se a mesma relação geométrica simples, representada pela equação 4.31, equivalente à equação 4.25:

$$\delta_j = \delta_1 \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_j} \right)^{1/3} \quad (\text{Eq. 4. 32})$$

Onde:

- δ_1 é o parâmetro delta calculado a partir dos dados de ganga livre (classe 1)
- δ_j é o tamanho médio da classe j
- ρ_1 é a densidade da ganga livre, classe 1
- ρ_j é a densidade média da classe j

E ϕ , em princípio permaneceria constante em todas as classes, entendendo que este parâmetro refere-se a condições de processo que, em média, se mantém constantes para todas as classes de liberação.

$$\Phi_j = \Phi_1 \quad (\text{Eq. 4. 33})$$

4.2.3 Recuperação na Espuma

O papel da espuma foi reconhecido desde o início do processamento por flotação como demonstram as descrições técnicas e estudos realizados por Gaudin (1939, 1957), Taggart (1945) e Sutherland (1955). A espuma é tão relevante que seu aspecto visual tem sido utilizado como forma de controle de qualidade da flotação desde os primórdios do processo e, nos últimos anos, técnicas de análise de imagem tem permitido o uso automatizado da aparência da espuma no controle de produção em usinas industriais. De modo particular, na flotação em colunas, o papel da espuma é preponderante e uma porção significativa de estudos nesta área é dedicada a este tipo de processo.

No momento da formação da espuma, as bolhas são separadas por filmes espessos de água ou de polpa diluída. Por efeito da gravidade e de pressões capilares entre bolhas, ocorre a drenagem deste líquido e o filme é adelgaçado até tornar-se frágil a ponto de ser rompido por qualquer ação externa, levando ou à ruptura total ou à ruptura parcial e fusão (coalescência) de bolhas adjacentes na espuma. A coalescência provoca desprendimento de partículas aderidas que podem retornar à polpa ou serem recoletadas ainda na espuma. Com a drenagem de líquido, bem como com o processo de coalescência, parte da ganga hidrofílica arrastada e mantida entre as bolhas retorna para a polpa. Assim, em uma extensão relevante, a espuma governa a qualidade do flotado e a recuperação dos minerais minério. A estabilidade da espuma, sua mobilidade, arraste e drenagem das partículas são os fatores mais importantes que afetam a recuperação e o teor. (Mathe, 1998)

A estabilidade de uma espuma é a medida de sua persistência. Esta estabilidade depende da vazão e tempo de residência do ar, altura da coluna de espuma, composição química do espumante, pH da polpa, temperatura e concentração do espumante, interação espumante - coletor, tamanho de partículas, hidrofobicidade e concentração de partículas na espuma. (Subramanyan e Fossberg, 1988)

A altura de espuma é também um fator relevante sobre a qualidade do processo, tendo sido amplamente estudada para colunas de flotação. Para células mecânicas, foi demonstrado que o teor e a concentração de várias espécies na espuma variam conforme a altura acima da interface polpa espuma e estes perfis são influenciados

significativamente pela vazão de ar e pelo modo de remoção de flotado (Cutting et al 1986).

Estes efeitos podem ser compreendidos principalmente como resultantes do aumento na drenagem em maiores espessuras de espuma o que, por sua vez, favorece a remoção de ganga hidrofílica dispersa na polpa, mas também pode gerar desprendimento maior. Assim, na flotação direta, espumas mais espessas tendem a gerar concentrados mais ricos e espumas mais delgadas apresentam recuperações mais altas, porém teores menores. Na flotação reversa, espumas mais espessas irão gerar uma maior recuperação no afundado e espumas mais delgadas apresentarão teores de afundado mais elevados, porém com recuperações menores.

Um maior nível de drenagem também afeta o perfil de distribuição de água. Em uma espuma típica, a camada superior é mais seca, devido ao escoamento de líquido em direção à polpa. Assim, a altura de espuma tem um efeito grande sobre a recuperação de água, que se reduz com o aumento da altura.

A partir de certo nível, o aumento na altura de espuma também dificulta o transporte de partículas maiores pelas bolhas, principalmente porque, no topo da espuma, as bolhas tendem a se tornar mais frágeis e menos aptas a manter a adesão de partículas maiores e mais pesadas (Ross, 1991).

Estes impactos da altura de espuma sobre a flotação são mais bem representados pela consequente variação no tempo de residência na espuma, que tanto pode ser representada por uma distribuição discreta ou contínua como pode ser simplificada pelo uso de um tempo médio determinado pela razão entre o volume de espuma e a vazão de ar ou outra razão equivalente. A vantagem do uso do tempo de residência é que nele são incluídos os efeitos da vazão de ar e da geometria da célula, em conjunto com a altura da espuma.

A recuperação na espuma também é dependente da vazão de ar. Para uma mesma altura de espuma, quanto maior a vazão de ar, maior a recuperação na espuma, até o limite em que a turbulência gerada pelo aumento na aeração provoca instabilidade. Neste ponto, a recuperação cai por excessivo colapso de bolhas e elevado retorno de material para a polpa.

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A percentagem de sólidos na polpa também afeta a qualidade da espuma. Polpas mais diluídas tendem a gerar espumas também mais diluídas, o que favorece uma maior drenagem de ganga, porém resultam em menor recuperação. No outro extremo, polpas com altas percentagens de sólidos perdem em seletividade, mas apresentam elevadas recuperações.

A influência dos espumantes e coletores bem como da interação entre eles na estabilidade da espuma é também um fator relevante. Até o momento, entretanto, não existe um modelo capaz de lidar com aspectos químicos de modo confiável.

Como todos estes parâmetros apresentam forte inter-relação, isto torna sua mensuração um tanto quanto complexa. Consequentemente, em modelos empíricos, a recuperação na espuma é o fator que tem sido considerado como um parâmetro prático para descrever a influência da espuma na flotação. (Mathe, 1998)

4.2.4 Recuperação na espuma - Modelamento

Embora a espuma tivesse sido estudada desde o início do processo de flotação, foi somente na década de 1960 que Arbiter and Harris (1962) indicaram que modelos de flotação deveriam considerar duas fases separadamente, polpa e espuma.

Além da utilização do conceito cinético para a espuma, nos anos 90, novos conceitos estabelecidos para flotação em coluna tornaram-se relevantes para modelamento de flotação em geral: a velocidade superficial do ar, J_g , e área superficial de bolha, S_b , descritas por Finch and Dobby (1990).

Até então, os modelos procuravam considerar o efeito da vazão de ar e tamanho de bolhas sobre a velocidade de flotação real na polpa k_{att} ou sobre uma estimativa de velocidade de transferência da espuma. Verificou-se que a velocidade de flotação real aumentava com um aumento de vazão de ar até atingir um máximo, após o qual aumentos posteriores na aeração afetavam a cinética negativamente, e por fim, rompiam totalmente a estabilidade da espuma. Ambos, a superfície de bolha total e o tamanho de bolha aumentam com o aumento da aeração. O primeiro efeito resulta em um aumento na velocidade de flotação, e o segundo, um decréscimo. O primeiro efeito é dominante em baixas vazões de ar, o segundo é predominante com aeração elevada. Em níveis de

aeração intermediários, eles são de magnitude igual e a aeração tem um efeito limitado sobre a velocidade de flotação. Daí vinha a necessidade de incluir conceitos que pudessem representar tanto o tamanho de bolha como a vazão de ar.

A velocidade superficial do ar, J_g , representa a medida da velocidade na qual o ar passa através da célula e é representada pela vazão volumétrica de ar e a área da seção transversal da célula, V_{air} e Area, respectivamente, de acordo com a definição da equação 4.33:

$$J_g = \frac{V_{air}^o}{Area} \quad (Eq. 4. 34)$$

A velocidade superficial é conveniente porque pode ser comparada para colunas ou células de diferentes diâmetros. Usualmente, é expressa em cm/s. Entretanto, J_g ainda não contém o efeito do tamanho de bolhas. De fato, se toda a vazão de ar estiver concentrada em uma única grande bolha – o que nunca será o caso em uma boa flotação – muito pouco material será coletado porque, entre outros fatores, a probabilidade de contato bolha-partícula será mínima. Em contraposição, se o ar estiver bem distribuído em inúmeras pequenas bolhas gerando uma grande superfície de ar ascendente, a flotação será eficaz. A figura 4.5 ilustra a diferença entre os dois casos.



Figura 4.5 –Duas condições de distribuição de bolhas para uma mesma vazão de ar

Um termo que incorpora tanto a velocidade superficial do ar quanto o diâmetro médio de bolhas é o fluxo de área superficial de bolha, S_b , definido por Finch and Dobby (1990) como a área total de superfície de bolha que se move ascendentemente em uma célula de flotação através de uma área transversal de célula por unidade de tempo, como ilustra a figura 4.6.

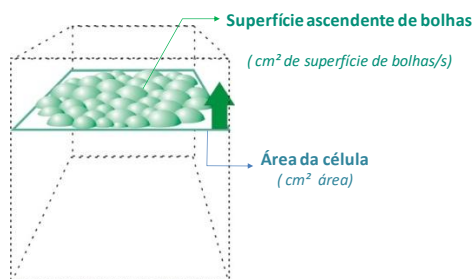


Figura 4.6- Diagrama esquemático representando o fluxo de área de superfície de bolha – S_b .

Matematicamente, S_b é expresso pela vazão de ar multiplicada pela razão de superfície de bolha e o volume de bolha, dividido pela seção transversal da coluna ou da célula. Isto resulta em:

$$S_b = \frac{6J_g}{d_b} \quad (\text{Eq. 4. 35})$$

Onde S_b = fluxo de área superficial de bolha ($\frac{\text{cm}^2 \text{ de superfície de bolhas} / \text{s}}{\text{cm}^2 \text{ área transversal de célula}}$ ou simplesmente s^{-1})

J_g = velocidade superficial do ar (cm/s)

d_b = diâmetro médio de Sauter (cm) . O diâmetro médio de Sauter é uma das formas de expressar o diâmetro médio de uma população de partículas, usado frequentemente em aplicações onde a área superficial é relevante, como é o caso na flotação. O diâmetro de Sauter é definido como o diâmetro da esfera que apresenta a mesma relação de área superficial sobre volume do que a média de todas as partículas juntas. Matematicamente:

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{\sum_{i=1}^n d_i^3}$$

Onde d_i = diâmetro esférico da bolha , n = tamanho da amostra

Ainda que por definição, S_b utilize o diâmetro de Sauter, outros diâmetros podem ser utilizados, desde que haja clareza no valor utilizado.

O conceito de S_b mostrou-se bastante útil e tornou-se relevante dentro do modelamento de flotação, particularmente após os trabalhos de Gorain (1997), que sugeriam que a velocidade de flotação global k correlacionava-se linearmente com S_b e que esta relação era constante para diversos tipos de impelidores. Uma relação linear havia sido

identificada entre k e S_b para cada fração tamanho sendo que a inclinação diferia para cada fração, os valores sendo maiores para frações mais finas.

Entretanto, estudos posteriores (Gorain, 1998) mostraram que esta relação entre k e S_b era válida somente em alturas de espuma menores enquanto em espumas de alturas intermediárias e profundas a relação não era linear. Com efeito, devido à coalescência de bolhas e consequente mudança no perfil de S_b ao longo da espuma bem como aos efeitos de desprendimento e drenagem, há significativo impacto no desempenho da flotação quando a altura de espuma é alterada. Foi proposta uma nova relação indicando que:

$$k = P \cdot S_b \cdot R_f \quad (Eq. 4. 36)$$

Onde R_f é a recuperação na fase de espuma e P representa a probabilidade de flotação ou flotabilidade do mineral de interesse.

A medida da recuperação na espuma está, em vários casos, ligada à medida da recuperação global e diretamente relacionada ao arraste mecânico. Vários modelos vinham e continuam sendo propostos tanto para representar como para mensurar e determinar este valor.

Até o momento, os métodos existentes para quantificar a recuperação na região de espuma podem ser divididos em duas categorias:

- Métodos de balanço de massa, nos quais relações de conservação de massa são utilizadas para representar a operação de uma célula de flotação em, pelo menos, duas diferentes condições. Isto permite o retro-cálculo simultâneo da recuperação na região de espuma e da velocidade de flotação na zona de coleta (Feteris et al., 1987; Laplante et al., 1989). Esta abordagem pode ser utilizada tanto em escalas de laboratório e piloto como em escala industrial, embora não haja necessariamente uma correlação direta de escalonamento entre elas. A necessidade de se modificar as condições operacionais, contudo, pode dificultar a implementação desta metodologia em células industriais de flotação.

- Métodos de medida direta, nos quais instrumentos especiais são utilizados para a medida do fluxo de partículas transportadas para a região de espuma por adesão à bolhas de ar (Falutsu e Dobby, 1992; Savassi et al, 1997; Alexander et al, 2003, Seaman et al., 2004). A recuperação na região de espuma é então calculada de acordo com o fluxo do flotado, após se descontar a contribuição do arraste mecânico. Esta metodologia utiliza amostragem não intrusiva da região de espuma e não é necessário se modificar a operação da célula industrial em que as medidas são realizadas.

Como o modelo dos compartimentos está entre os métodos de balanços de massas, esta abordagem é a que será detalhada.

Conforme já mostrado para a recuperação de partículas aderidas (ver figura 4.2), a relação entre a recuperação na região de coleta e a recuperação na região de espuma é dada pela equação 4.10.

$$R_{att} = \frac{R_C \cdot R_f}{R_C \cdot R_f + 1 - R_C} \quad (Eq. 4. 37)$$

Como esta relação é válida quando o arraste mecânico não é significativo, diversos modelos baseiam-se na avaliação da variação do k global com parâmetros relativos à espuma. Em outras palavras, como, por balanço, a recuperação global R é dependente da recuperação na espuma R_f , deve existir uma relação entre k e k_f e diversos modelos baseiam-se neste tipo de relação. Em outra linha de cálculo, R_f é calculada a partir de um modelo que a relaciona com algum parâmetro que possa ser obtido por regressão entre os dados de recuperação global e recuperação na zona de coleta.

No modelo de Gorain et al (1998), desconsiderando-se a recuperação por arraste mecânico, observou-se que a recuperação na espuma era uma função de decaimento exponencial do tempo de retenção, como mostra a equação 4.37:

$$R_f = \exp (- \beta \cdot \tau_f) \quad (Eq. 4. 38)$$

Onde β é um parâmetro que depende das propriedades físicas e químicas da polpa e, teoricamente, estaria associado à velocidade de drenagem (Gorain et al, 1998). Para determinar R_f , é necessário realizar ensaios com diferentes tempos de residência na

espuma e ajustar o parâmetro β . Para incluir o efeito do arraste mecânico, este modelo pode ser escrito como (Harris, 1998; Vera, 2002):

$$R_f = (1 - ENT \cdot R_{wf}) \cdot \exp(-\beta \cdot \tau_f) + ENT \cdot R_{wf} \quad (Eq. 4.39)$$

Estes dois modelos correspondem a considerar que a recuperação na espuma segue uma cinética de decaimento primeira ordem. No caso, β representa a constante cinética da espuma.

Segundo a revisão realizada por Ata (2012), o desprendimento seletivo de acordo com o tamanho de partícula e sua hidrofobicidade foi reportado em vários estudos. (Falutsu and Dobby, 1992; Honaker et al., 2006; Yianatos et al., 1988). Existem também evidências do fenômeno de recoleta de partículas hidrofóbicas. Neste trabalho, será possível verificar a existência deste efeito e propor modificações ao modelo ou um novo modelo.

4.2.5 Recuperação de água

Embora nem sempre seja mencionada explicitamente em diversos modelos, a recuperação de água é um dos fatores relevantes no modelamento e simulação porque está diretamente associada ao cálculo de tempo de residência, assim como à determinação dos volumes de carga circulante.

Ainda que indiretamente, o fenômeno do transporte de água já foi parcialmente descrito nas seções de arraste mecânico e recuperação na espuma. De fato, os principais mecanismos que afetam a recuperação de água em uma célula convencional são o arraste - ou a ação das bolhas de ar no transporte de água da polpa para a espuma e da espuma para o flotado - e a drenagem causada por escoamento entre as bolhas ou por ruptura de bolhas.

Em termos de modelamento de flotação, foi somente a partir do desenvolvimento dos trabalhos sobre arraste mecânico na década de 70 que a recuperação de água passou a ser

examinada com maior cuidado e são desta época os primeiros modelos em que a recuperação de água foi considerada de maneira indireta, por associação com a percentagem de sólidos.

Posteriormente, os modelos corresponderam a correlações empíricas com parâmetros já mensurados para o cálculo da recuperação de sólidos. Zheng (2004) apresenta uma revisão bastante ampla deste tema, incluindo uma avaliação de diversos modelos, que serão resumidos a seguir.

No modelo de Savassi et al (1998), a recuperação de água R_w é associada ao tempo de retenção na espuma τ_f :

$$R_w = a \cdot \tau_f^b \quad (\text{Eq. 4. 40})$$

Onde a e b são parâmetros ajustados.

A vazão de água recuperada (Q_w) também pode ser definida por uma função de potência da vazão de sólidos do flotado F_s :

$$Q_w = c \cdot F_s^d \quad (\text{Eq. 4. 41})$$

Onde c e d são parâmetros ajustados.

De modo similar ao já descrito para recuperação mineral, a recuperação de água pode ser entendida através de dois subprocessos: o transporte de água da polpa para a espuma e o transporte da espuma para o flotado. Uma equação semelhante à de recuperação de sólidos pode ser definida.

$$R_w = \frac{R_{cw} \cdot R_{fw}}{R_{cw} \cdot R_{fw} + (1 - R_{cw})} \quad (\text{Eq. 4. 42})$$

Onde R_w é a recuperação global de água, R_{cw} é a recuperação de água da polpa para a espuma e R_{fw} é a recuperação de água na espuma.

Se a recuperação de água na espuma é assumida como apresentando uma relação exponencial, como indica o modelo de Gorain, então:

$$R_{fw} = \exp(-\beta_{fw} \cdot \tau_f) \quad (\text{Eq. 4. 43})$$

A equação relativa ao balanço de massas pode ser reescrita como:

$$\frac{R_w}{1 - R_w} = \frac{R_{cw}}{1 - R_{cw}} \cdot R_{fw} \quad (\text{Eq. 4. 44})$$

E a inclusão do modelo de Gorain nesta fórmula fornece:

$$\frac{R_w}{1 - R_w} = \frac{R_{cw}}{1 - R_{cw}} \cdot \exp(-\beta_{fw} \cdot \tau_f) \quad (\text{Eq. 4. 45})$$

Deste modo, uma vez que os valores globais de R_w são conhecidos, uma interpolação de $R_w/(1-R_w)$ versus τ_f para os três ensaios permite obter os valores dos parâmetros β_{fw} e R_{cw} e, assim, calibrar o modelo.

Embora apresentem expressões matemáticas distintas, os modelos de Gorain e Savassi (1998) para recuperação de água, por sua natureza, tendem a gerar resultados similares, devido ao formato semelhante das curvas que representam a relação da recuperação com o tempo de retenção. O modelo do JKSimfloat depende da massa de sólidos gerada no flotado e requer a estimativa deste valor, ou seja, não apresenta relação com uma condição de processo, mas com um outro resultado da flotação. Neste caso, é necessário modelar a recuperação de massas para obter a recuperação de água.

A tabela 4.1 apresenta os modelos utilizados em paralelo com o modelo dos compartimentos.

Tabela 4.1- Alguns modelos matemáticos paralelos que podem ser utilizados em conjunto com o modelo dos compartimentos

Fenômeno	Modelos paralelos
Arraste (ENT)	Bisshop and White $ENT = \frac{1 + \alpha \cdot \tau_f}{1 + \epsilon_i \cdot \tau_f}$ $\alpha = \kappa_1 \cdot (\rho_m - \rho_p)$ $\epsilon_i = \alpha \cdot \exp(\kappa_2 \cdot d_i)$ α e ϵ são os parâmetros de drenagem de água e de partículas arrastadas, respectivamente, τ é o tempo de residência na espuma, ρ_m e ρ_p são a densidade das partículas minerais e da polpa respectivamente, d_i é o diâmetro equivalente de sedimentação das partículas arrastadas e κ_1 e κ_2 são constantes
Arraste	Savassi et al. $ENT_{i,j} = \frac{1}{\cosh(A)}$ $A = 2.292 \cdot \left(d_i / \xi_j \right)^B$ $B = 1 - \frac{\ln(\varphi_j)}{\exp(d_i / \xi_j)}$ O parâmetro ξ representa o tamanho de partícula para o qual o grau de arraste mecânico é igual a 20 %, enquanto que o parâmetro δ indica a facilidade de drenagem da camada de espuma. Os parâmetros A e B são apenas auxiliares para a expressão da fórmula em duas partes mais simples. Yianatos and Contreras $ENT = \exp \left(-0,693 \left(\frac{d_i}{\delta} \right)^\varphi \right)$ $d_{p,i}$ é o tamanho de partícula na i-ésima classe, o parâmetro δ corresponde ao diâmetro médio para o qual o fator de arraste é igual a 0,5 e φ é o parâmetro de drenagem, que depende das características do mineral e das condições de operação da célula

Tabela 4.1 (Continuação) - Alguns modelos matemáticos paralelos que podem ser utilizados em conjunto com o modelo dos compartimentos

Fenômeno	Modelos paralelos	
Recuperação na espuma (R_f)	Gorain et al. $R_f = \exp(-\beta \cdot \tau_f)$	β é um parâmetro que depende das propriedades da espuma e τ_f é o tempo de residência na espuma
	Vera et al. $R_f = (1 - \text{ENT} \cdot R_{wf}) \cdot \exp(-\beta \cdot \tau_f) + \text{ENT} \cdot R_{wf}$	β é um parâmetro que depende das propriedades da espuma, τ_f é o tempo de residência na espuma e R_{wf} é a recuperação de água na espuma
Recuperação de água na espuma (R_{fw})	Gorain et al. $R_{fw} = \exp(-\beta_{fw} \cdot \tau_f)$	β é um parâmetro que depende das propriedades da espuma e τ_f é o tempo de residência na espuma
Flotação Real na zona de coleta (já inclusa na expressão geral do modelo dos compartimentos).	Cinética de primeira ordem em regime de mistura perfeita $R_{att}^{CZ} = \frac{k_{CZ} \cdot \tau_{CZ}}{1 + k_{CZ} \cdot \tau_{CZ}}$	τ_{CZ} = tempo médio de residência na zona de coleta k_{CZ} = velocidade de flotação na zona de coleta

É importante ressaltar que, com exceção do modelo de arraste mecânico, estes modelos foram desenvolvidos para o comportamento do minério como um todo. A adequação dos modelos por fração granulométrica ou classe de liberação será avaliada neste trabalho.

Capítulo 5 - Metodologia

5.1 Escolha, preparação e caracterização do minério

Para a realização deste estudo, foi utilizado minério de cobre calcopirítico proveniente de um depósito na região de Carajás, PA, Brasil. Este minério foi escolhido por apresentar cobre essencialmente calcopirítico, sem a presença significativa de outros minerais de cobre sulfetados ou que apresentassem flotação em paralelo à calcopirita, o minério continha apenas uma pequena proporção de pirita. Esta característica facilita a análise mineralógica e sua consolidação com os dados de análise química para cobre. Isto permite simplificar a análise do processo considerando somente duas fases minerais principais: calcopirita e ganga.

A amostra de minério foi recebida em matacões de tamanho variável, os maiores apresentando cerca de 60 cm, com menor proporção de material fino.

Esta amostra foi peneirada em 6,3 mm ($\frac{1}{4}$ ”), para retirada de material fino que poderia apresentar problemas de oxidação. Devido à dificuldade em tratar o material excessivamente grande, não foram utilizados os matacões de tamanho superior a 20 cm.

O produto nesta faixa foi britado abaixo de $\frac{1}{4}$ " e, em seguida, abaixo de 1mm. Foram quarteadas alíquotas para processamento em planta piloto, ensaios de bancada, análise química e mineralógica. A análise granulométrica foi realizada nas frações 210, 150, 74 e 44 μm , com cyclosizer da fração abaixo de 44 μm . A análise química foi realizada para os elementos Cu, Fe, Si e S, para a amostra global e para frações granulométricas. Estes teores foram utilizados para calcular a mineralogia, utilizando-se, para isto, das relações químicas destes elementos nos minerais calcopirita, pirita e óxidos de ferro. A análise mineralógica para determinação das classes de liberação foi conduzida para as frações granulométricas -210+150 μm , -150+74 μm , -74+44 μm , -44 +20 μm .

Para a moagem, foi utilizada a granulometria equivalente a cerca de 80%<210 μm (65#), utilizada no beneficiamento deste minério.

5.2 Preparação da Mini Planta Piloto

A Mini Planta Piloto (MPP) é um equipamento de condução de ensaios contínuos de flotação em escala de laboratório, com capacidade de reproduzir circuitos completos. A MPP é composta por 12 células de 1700 ml que apresentam formato semelhante ao das células Denver D12 de laboratório e utilizam o mesmo tipo de rotor e impelidor, porém incluem um controle individual de nível de polpa. O nível de instrumentação é elevado. Cada célula possui um controle digital de aeração, pH/Eh, velocidade do rotor e das espátulas de retirada de espuma. Os concentrados e rejeitos são conduzidos de célula a célula por pequenas bombas peristálticas. Uma grande variedade de circuitos de flotação pode ser reproduzida, incluindo as mais diversas combinações de etapas rougher, scavenger e cleaner. A foto da figura 5.1 mostra este equipamento.



Figura 5.1 – Mini Planta Piloto de Flotação

Por sua forma compacta, sua instrumentação precisa e pelos níveis baixos de vazão dos fluxos (5 - 15 kg/h), a MPP possibilita um grande controle das variáveis de processo. Além disto, as vazões pequenas possibilitam amostragens de todo o volume de vários fluxos, aumentando de modo extremamente significativo a representatividade das amostras em relação ao processo. Isto a torna um equipamento bastante adequado à realização de ensaios voltados para simulação.

5.2.1 Cálculo da aeração à pressão atmosférica

Na MPP, cada célula possui um medidor de vazão de ar acoplado a uma válvula ligada à linha de ar comprimido o que permite o controle e a medida da aeração com boa precisão. A pressão na linha de ar comprimido que alimenta a planta também é regulável.

Entretanto, a medida de vazão de ar é feita sob a pressão da linha de ar. Isto significa que, uma vez que o ar é liberado na célula sob pressão atmosférica, ocorre uma expansão e a aeração real é superior à indicada no medidor.

Assim, foi necessário determinar a vazão de ar real, à pressão atmosférica, para um dado valor indicado no painel de controle da MPP, sob pressão. Foi realizada uma série de medidas simples de volume de ar, utilizando-se o volume de água deslocado em uma

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

proveta invertida. Como resultado obteve-se um fator de correção para ajuste. Os resultados deste ajuste podem ser vistos no Anexo II.

5.2.2 Preparação e medição das células

Para os ensaios piloto, foi utilizado um constritor de espuma (froth crowder) em todas as células. A utilização deste dispositivo teve como objetivo manter a maior área possível acessível às paletas de remoção de espuma, evitando a presença de zonas mortas. A figura 5.2 apresenta uma foto de uma das cubas, montada em célula de laboratório, para ilustração.

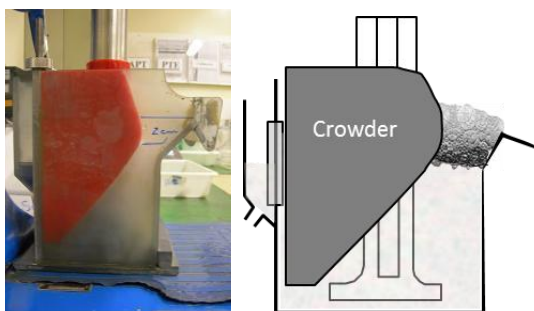


Figura 5.2 – Foto e diagrama da cuba MPP com crowder. A marca indica a altura de 2 cm

A partir das dimensões da cuba e do crowder, foram calculadas as áreas e volumes relativos à espuma e polpa para cada ensaio. Estas medidas permitem calcular os tempos de residência em cada região da célula. As figuras 5.3 e 5.4 apresentam os diagramas utilizados para calcular os volumes de polpa e espuma.

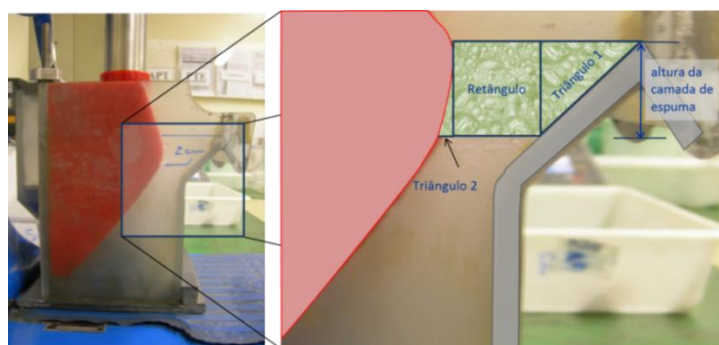


Figura 5.3 – Imagem da cuba MPP com crowder e diagrama de formas geométricas utilizado para calcular os volumes de espuma

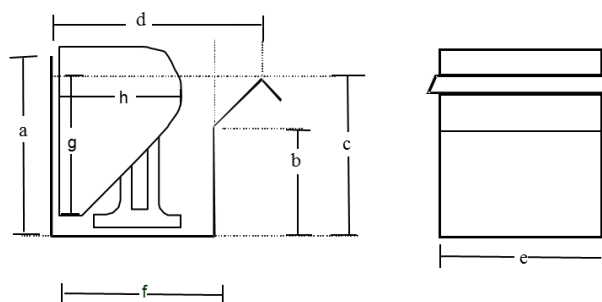


Figura 5.4 – Diagrama da cuba MPP com crowder indicando as dimensões utilizadas para calcular os volumes de polpa e espuma

5.3 Ensaios de Calibração

Os ensaios de calibração são o cerne do desenvolvimento do modelo. Cada ensaio é realizado com um conjunto de condições e é a relação entre estas condições e seus resultados que possibilita determinar os parâmetros necessários para definir o modelo. Uma vez calibrado, o modelo pode ser utilizado para simular os resultados em outras situações, desde que estas estejam dentro dos limites estabelecidos pelas premissas que definem, matemática ou conceitualmente, as relações de causa e efeito.

A principal alteração entre os ensaios de calibração corresponde à mudança na altura de espuma, com consequente alteração no tempo de retenção nesta fase. A função desta diferença é permitir calcular a recuperação na espuma, bem como garantir a adequada estimativa dos demais parâmetros de processo necessários para a utilização do modelo.

Para os ensaios de calibração, a moagem inicial do minério foi efetuada em moinho de barras, em bateladas de 20 kg de minério em polpa a 60% de sólidos, por um tempo pré-determinado para atingir a granulometria desejada, de $80\% < 210\mu\text{m}$. O produto moído foi levado a um tanque agitado, a percentagem de sólidos foi ajustada para 32% e a polpa foi bombeada para o tanque de alimentação e em seguida para a Miniplanta através de bombas peristálticas. Em todos os ensaios, a vazão de alimentação correspondeu a 110-118g/min de minério (base seca), equivalentes a cerca de 7 kg/h.

Os ensaios em escala piloto foram realizados usando um circuito simples, rougher, scavenger e cleaner. Como este circuito teve como objetivo, além de avaliar a recuperação global, prover dados para avaliar as características de flotação de classes tamanho-

liberação, não houve uma etapa de remoagem de concentrados intermediários, o que requereria uma completa mudança na distribuição granulométrica e, por conseguinte, uma total reelaboração do modelo no meio do circuito, o que fugiria do escopo do trabalho.

Os ensaios foram realizados em circuito aberto, visando obter uma precisão elevada na determinação dos parâmetros, já que, neste caso, a amostragem dos fluxos não está sujeita a problemas de estabilização de circuito. A figura 5.5 apresenta a configuração utilizada

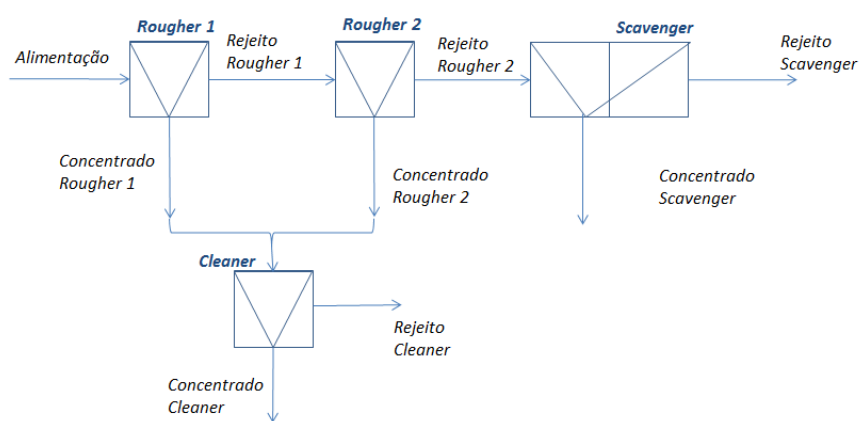


Figura 5.5– Fluxograma e diagrama de disposição das células da MPP para o circuito usado nos ensaios de calibração

As condições de reagentes foram ajustadas para o minério avaliado. Como coletores foram utilizados amil xantato de sódio - Aeropromoter 350 (A 350), da Cytec - e isopropil metileno tionofosfato de sódio - SF 632, da Shell. Como espumantes, foram usados éter de polipropileno glicol e etileno glicol - Aerofroth 65 (A65), também da Cytec - e MIBC, metil isobutil carbinol. A tabela 5.1 apresenta as dosagens utilizadas e pontos de adição.

Tabela 5.1– Dosagens de reagentes utilizadas nos ensaios em planta piloto.

		Dosagem (g/t)	Ponto de adição
Coletores	A 350	11	Condicionamento
	SF632	11	Condicionamento
	A 65	11	Rougher 1
Espumantes	MIBC	11	Rougher 1
	MIBC	11	Scavenger 1

É importante mencionar que nos modelos avaliados neste trabalho não são consideradas as relações entre o ambiente químico e o minério, ou seja, questões relativas a possíveis variações em dosagem de reagentes, pH, Eh e oxidação superficial não fazem parte da abordagem de calibração e modelamento, que se fundamentam nos aspectos físicos/mecânicos da flotação. Desta forma, em termos quantitativos, os dados obtidos nesta abordagem são válidos para a dosagem apresentada na tabela 5.1.

Para a calibração do modelo foi necessário operar esta configuração utilizando três diferentes alturas de espuma no primeiro rougher. Como isto provoca mudanças na flotação rougher, a altura da espuma e aeração nas demais células foram definidas para compensar o efeito provocado, ou seja, as outras células tiveram as condições ajustadas para possibilitar uma recuperação global equivalente. Cada configuração completa definiu um ensaio (CAL 1, CAL 2, CAL 3), caracterizado pela altura de espuma da primeira célula rougher. A tabela 5.2 apresenta as condições gerais de aeração.

Tabela 5.2– Condições gerais utilizadas nos ensaios de calibração

Ponto	Cal 01			Cal 02			Cal 03		
	Altura de Espuma (cm)	Vazão de ar (L/min)	Rotação (rpm)	Altura de Espuma (cm)	Vazão de ar (L/min)	Rotação (rpm)	Altura de Espuma (cm)	Vazão de ar (L/min)	Rotação (rpm)
Condicionamento			938			938			938
Célula Rougher 1	2	1,03	938	3	0,92	938	4	0,92	943
Célula Rougher 2	1,5	0,98	939	2	1,18	937	1,5	1,19	937
Célula Scavenger 1	1,5	1,81	993	1,5	1,81	992	1	1,87	996
Célula Scavenger 2	1,5	1,76	995	1,5	1,78	995	1	1,79	996
Cleaner	1,5	0,72	743	2	0,7	892	3	0,72	732

Durante cada ensaio, a estabilização do circuito foi verificada através das vazões de polpa e sólidos, bem como dos teores de cobre, analisados por RX. A amostragem de cada ensaio foi conduzida durante tempo suficiente para que houvesse geração de produtos em quantidade bastante para as análises necessárias. Os ensaios iniciavam-se na configuração completa e **todo o volume de fluxo do concentrado cleaner, do rejeito cleaner e do concentrado scavenger** foram coletados por **2h30min**, o que também garantiu uma representatividade de amostragem extremamente elevada para estes produtos. Como as vazões de rejeito rougher e scavenger eram elevadas, a amostragem destes fluxos foi realizada em incrementos coletados por um minuto a cada 15 minutos, dentro do período de 2:30 horas. Cada incremento também corresponde à coleta de todo o volume de fluxo

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

por um minuto. Após a coleta dos produtos cleaner, os *concentrados rougher 1 e 2* foram coletados segundo os mesmos critérios, por 2h30min, que é o tempo necessário para cobrir um período de variação de fluxo na miniplanta piloto. A tabela 5.3 resume a sequência de amostragem.

Tabela 5.3 - Plano de amostragem para ensaios de calibração

Ordem	Produto	Tempo de amostragem
1	Alimentação	15 s
2	Concentrado Cleaner	2h 30 min
	Rejeito Cleaner	2h 30 min
	Concentrado Scavenger	2h 30 min
	Rejeito Scavenger	1 alíquota de 1 minuto a cada 15 minutos durante 2h30min
3	Concentrados Rougher 1+2	5 min
4	Concentrado rougher 1	2h 30 min
	Concentrado rougher 2	2h 30 min
	Rejeito Rougher 2	1 alíquota de 1 minuto a cada 15 minutos durante 2h30min
5	Rejeito Rougher 1	1 min
6	Alimentação	1 min

Apenas para dar uma ideia do nível de representatividade que este plano possui para o circuito rodado na Mini Planta Piloto, cabe avaliar o erro de amostragem de processo, entendendo por amostragem de processo (ou amostragem propriamente dita) apenas a coleta da amostra a partir do circuito como mostrado na tabela 5.3.

Segundo a abordagem de Pierre Gy (Góes, Luz, and Possa 2004), este erro de amostragem é o somatório de sete erros independentes entre si e que são causados pela forma de coleta da amostra e pela variabilidade das diversas características do material amostrado. A equação 5.1 apresenta a fórmula deste erro:

$$EA = Ea_1 + Ea_2 + Ea_3 + Ea_4 + Ea_5 + Ea_6 + Ea_7 \quad (Eq. 5.1)$$

A tabela 5.4 expressa cada um dos termos e o valor para esta amostragem da MPP.

Tabela 5.4 – Erros de amostragem segundo Pierre Gy

Termo	Descrição	Valor na amostragem da MPP
Ea ₁	Erro de ponderação, causado pela variação de densidade ou de vazão do material amostrado	Ea1 = 0 porque todo o volume de fluxo é amostrado durante o tempo de coleta
Ea ₂	Erro de integração - termo regional, resultante da heterogeneidade de distribuição das partículas, ao longo do tempo e no longo prazo, no material	Para as amostras principais coletadas por 2h30min (ver tabela 5.3), Ea2 ≈ 0 porque todo o volume de fluxo é amostrado durante as 2h30min
Ea ₃	Erro de periodicidade, causado por variações periódicas da característica de interesse do material amostrado	Para as amostras coletadas por 2h30min (ver tabela 5.3), Ea3 = zero porque todo o volume de fluxo é amostrado e este tempo equivale ao ciclo de oscilação de fluxo quando a MPP está em regime permanente. Ea3 será mínimo para as demais amostras por que todo o volume de fluxo é coletado por um minuto em cada um dos 11 incrementos feitos a cada 15 minutos, cobrindo também o ciclo de oscilação de 2h30min.
Ea ₄	Erro fundamental, causado pela heterogeneidade de constituição do material amostrado.	Este é inevitável, mas será baixo porque a amostra inicial havia sido homogeneizada após a britagem em ¼” e esta amostra foi utilizada para alimentar a planta durante toda a sequência de testes.
Ea ₅	Erro de segregação, causado, como o nome indica, por segregação ou heterogeneidade locacional do material	Ea5 = zero porque todo o volume de fluxo é amostrado.
Ea ₆	Erro de delimitação, resultante da configuração incorreta da dimensão dos incrementos	Ea6 = zero porque todo o volume de fluxo é amostrado.
Ea ₇	Erro de extração, resultante da extração efetiva dos incrementos	Ea7 = zero porque todo o volume de fluxo é amostrado.

Assim, o erro da amostragem de processo neste circuito da MPP (tal como indicado na tabela 5.3) é apenas o erro fundamental, que será baixo. Esta é uma condição de erro que é ordens de magnitude mais baixa do que os erros encontrados em plantas industriais, simplesmente porque todo o fluxo de produto é amostrado em cada linha do circuito. Esta é uma grande vantagem da MPP: possibilitar este nível de precisão para realizar ensaios de flotação contínuos.

A coleta completa dos fluxos principais permitiu medir as vazões de sólidos e água em cada uma das correntes, a partir do tempo de amostragem e das massas obtidas.

Os produtos foram analisados granulometricamente nas frações 210, 150, 74 e 44 μm , com cyclosizer da fração abaixo de 44 μm , gerando frações de finos que foram agrupadas em -44+20 μm e <20 μm . A análise química foi realizada para os elementos Cu, Fe, Si e S, para a amostra global e para frações granulométricas, sendo que as análises de cobre, ferro e silício foram realizadas utilizando-se plasma e a análise de enxofre, utilizando-se Leco.

A análise mineralógica para determinação das classes de liberação foi conduzida em QEMScan para as frações granulométricas -210+150 μm , -150+74 μm , -74+44 μm , -44+20 μm , para a alimentação e produtos concentrado rougher 1, rejeito rougher 2, concentrado scavenger, concentrado cleaner e rejeito cleaner. Os valores de mineralogia para as demais frações de cada produto foram obtidas a partir das estimativas do próprio QEMScan. A densidade foi determinada para os produtos globais e frações.

5.3.1 Balanços de Massas e Determinação das Recuperações

Os balanços de massas foram realizados sequencialmente, sendo o resultado de cada balanço utilizado como referência para o balanço subsequente, como detalhado no item 3.3 de revisão bibliográfica. Para reconciliação dos dados, foram utilizados os softwares Bilmat e Bilco.

Capítulo 6 - - Resultados – Parte 1 **Caracterização do Minério e Parâmetros** **dos Ensaios de Calibração**

6.1 Caracterização da amostra inicial

6.1.1 Caracterização Química e Granulometria

A amostra de minério utilizada foi proveniente da região norte do Brasil e apresentou teor próximo a 2% de cobre, equivalente a cerca de 6% de calcopirita. A tabela 6.1 apresenta a análise química da amostra. Os teores de cobre, ferro e enxofre foram convertidos em teores de calcopirita e pirita, a partir da relação existente entre estes elementos na composição destes minerais, considerando que estes são os principais sulfetos e que o cobre é essencialmente calcopirítico como demonstrado pela análise mineralógica. Assim, o teor de cobre corresponde a 34,6% da massa de calcopirita – Cu Fe S_2 -e a diferença entre o enxofre analisado e o conteúdo de enxofre no total de calcopirita (34,9%) equivale a 53,4% do teor de pirita, Fe S_2 .

Tabela 6.1 - Resultados de análise química do minério de cobre – Alimentação dos ensaios

Teores amostra de minério			Teores estimados de minerais		
Cu%	Fe %	S %	Calcopirita	Pirita	Ganga
2,11	12,64	2,45	6,10	0,61	93,30

A distribuição granulométrica e teores por fração são apresentados na tabela 6.2. Para esta amostra, o cobre distribui-se de modo relativamente homogêneo entre as frações granulométricas, com cerca de 55% do cobre contido na porção acima de $44\mu\text{m}$.

Tabela 6.2 - Distribuição granulométrica, teores e distribuição de cobre por fração da alimentação

Alimentação												
Tamanho		Distri. Granulométrica (%)			Teor de Cu (%)	Teor de Cu acum (%)	Distribuição de Cu (%)			Teor de Fe(%)	Teor de S (%)	Teor de CPY Calc (%)
Malha / Cyclosizer	µm	retido simples	retido acum.	pass acum			retido simples	retido acum.	pass acum			
Alimentação		100,0%	-	-	2,15		-	-	-	12,39	2,11	6,22
65	210	11,7%	11,71%	88,3%	1,06	1,06	5,8%	5,8%	94,2%	10,67	1,16	3,06
100	149	15,3%	27,04%	73,0%	1,67	1,41	11,9%	17,65%	82,3%	12,73	1,74	4,83
200	74	22,3%	49,31%	50,7%	1,87	1,62	19,3%	37,00%	63,0%	13,71	2,48	5,40
325	44	14,0%	63,30%	36,7%	2,72	1,86	17,7%	54,67%	45,3%	14,74	3,09	7,86
C1	32	6,7%	70,0%	30,0%	5,77	2,23	17,9%	72,54%	27,5%	24,86	6,31	16,68
C2	25	7,8%	77,7%	22,3%	2,45	2,25	8,8%	81,36%	18,6%	11,64	2,74	7,08
C3	20	6,9%	84,6%	15,4%	1,97	2,23	6,3%	87,64%	12,4%	10,87	2,14	5,69
C5	9	3,1%	92,8%	7,2%	1,70	2,19	2,4%	94,40%	5,6%	11,05	1,76	4,91
O/f	3	7,2%	100,0%	0,0%	1,67	2,15	5,6%	100,00%		11,86	1,64	4,83

Entre as frações 210 e 44 µm, os teores de cobre aumentam ligeiramente para as partículas de menor tamanho. Observa-se um aumento significativo de teor na fração retida em 32µm, correspondente ao primeiro cyclosizer. Este aumento é devido à diferença no método de determinação do tamanho de partícula. Como no cyclosizer o tamanho de partícula é determinado por classificação em ciclones, partículas de menor tamanho, mas de maior densidade tendem a ser retidas juntamente com partículas maiores, porém mais leves. A maior densidade da calcopirita gera uma concentração no primeiro ciclone do cyclosizer, o que leva a um teor aparentemente mais elevado nesta fração, de 32 µm. Para minimizar este efeito, e também para permitir a obtenção de massa razoável para as análises, nas amostras de ensaios, as frações dos ciclones C1 a C3 do cyclosizer foram misturadas, homogeneizadas e consideradas como uma única fração (-44 + 20 µm). A tabela 6.3 apresenta os resultados. A figura 6.1 mostra a curva granulométrica e o teor de cobre nas frações.

Tabela 6.3 -Distribuição granulométrica, teores e distribuição de cobre por fração da alimentação

Alimentação												
Tamanho		Distri. Granulométrica (%)			Teor de Cu (%)	Teor de Cu acum (%)	Distribuição de Cu (%)			Teor de Fe(%)	Teor de S (%)	Teor de CPY Calc (%)
Malha / Cyclosizer	µm	retido simples	retido acum.	pass acum			retido simples	retido acum.	pass acum			
Alimentação		100,0%	-	-	2,15		-	-	-	12,42	2,10	6,22
65	210	11,7%	11,71%	88,3%	1,06	1,06	5,8%	5,8%	94,2%	10,67	1,16	3,06
100	149	15,3%	27,04%	73,0%	1,67	1,41	11,9%	17,65%	82,3%	12,73	1,74	4,83
200	74	22,3%	49,31%	50,7%	1,87	1,62	19,3%	37,00%	63,0%	13,71	2,48	5,40
325	44	14,0%	63,30%	36,7%	2,72	1,86	17,7%	54,67%	45,3%	14,74	3,09	7,86
C1-C3	20	21,3%	84,6%	15,4%	3,34	2,23	33,0%	87,64%	12,4%	10,87	2,14	9,64
<20	3	10,3%	100,0%	0,0%	1,68	2,15	8,0%	100,00%		11,86	1,64	4,85

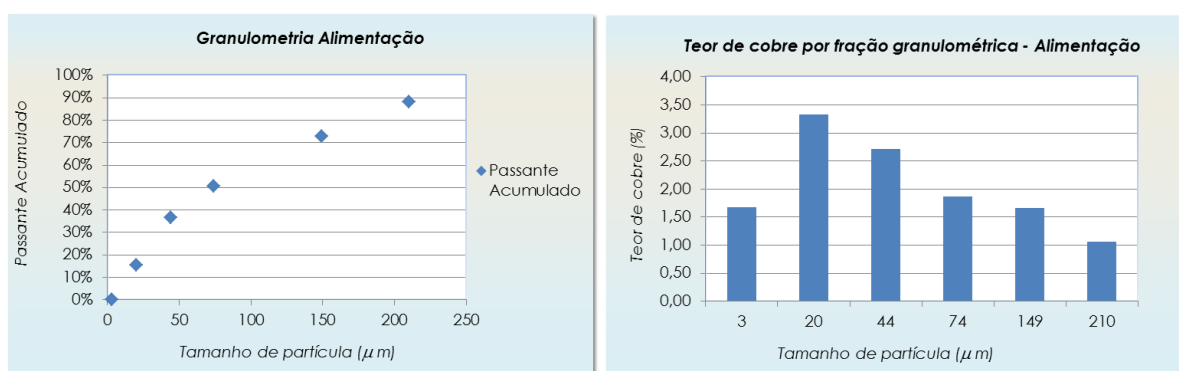


Figura 6.1 – Distribuição granulométrica e teores de cobre por fração de tamanho

6.1.2 Caracterização Mineralógica

Na amostra utilizada de minério, a calcopirita é o principal mineral de cobre e equivale a cerca de 6% da amostra. Raramente é observada a presença de covelita (em partículas liberadas ou bordejando a calcopirita), digenita e raríssima malaquita. A ganga é composta principalmente por quartzo, feldspatos, actinolita, óxidos de ferro, mica e clorita. Para todos os efeitos, o minério foi considerado como um sistema binário composto por calcopirita e ganga.

De modo geral a calcopirita ocorre:

- em cristais de granulação grossa na forma de partículas 100% liberadas com aproximadamente 1mm de diâmetro, que representam fragmentos de porções originalmente de granulação maior.

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

- em cristais médios que compõem partículas mistas, na qual a calcopirita ocorre intersticialmente, envolvendo e cimentando cristais de silicatos.
- em cristais muito pequenos ($<2\mu\text{m}$), predominantemente inclusos em silicatos e carbonatos e ainda na magnetita.

6.2 Parâmetros gerais dos ensaios de calibração

6.2.1 Ajuste da aeração

Como resultado das medidas de volume de ar à pressão atmosférica em comparação com a aeração forçada da célula, obteve-se um fator de correção indicando que, em média, nas células da MPP, quando a vazão indicada nos medidores é igual a 1 L/min, sob uma pressão de $1,05 \text{ kgf/cm}^2$, o volume real de ar à pressão atmosférica é dado por:

$$V_{\text{real}} = 2,12V_{\text{medido}}$$

6.2.2 Medidas das células para cálculo de volumes de espuma

As medidas detalhadas das células, usadas para determinar os volumes de espuma e as áreas das seções transversais são apresentadas no Anexo II. A tabela 6.4 mostra os valores destas medidas para os ensaios de calibração.

Tabela 6.4 - Áreas de seções transversais das células e vazão de ar para cada condição dos ensaios realizados

Etapa	Teste	Altura de	Área Total	Largura	Volume	Área Seção	Área Seção	Área Seção	Vazão ar	Vazão ar
		Espuma	cm ²	cm	Espuma	transversal - Topo Espuma	transversal - Base Espuma	transversal Base Célula (Cz)	injetada sob pressão	ajustada para pressão ambiente
RG1	Cal 1	2	9,1	11,4	103,7	61,56	42,18	109,8	1,03	2,2
	Cal 2	3	12	11,4	136,8	61,56	31,92	109,8	0,92	2,0
	Cal 3	4	14,82	11,4	168,9	61,56	30,78	109,8	0,92	2,0

Capítulo 7 - Resultados - Parte 2 -

Balanços de Massas dos Testes de Calibração

7.1 Resultados dos balanços globais

As tabelas 7.1 a 7.3 apresentam os dados amostrados e resultados dos balanços de massas para os ensaios de calibração Cal 1 a Cal 3. Estes balanços foram realizados utilizando-se o programa Bilmart incluindo todos os dados amostrados de todos os fluxos: *massas de sólidos, vazões de polpa, percentagens de sólidos e teores de cobre*. Importante notar que *a vazão de polpa e sólidos foi medida para todos os fluxos*, o que é raríssimo em testes contínuos nos projetos minerais. Mais do que isto, *para todos os concentrados/flotados, a totalidade da massa gerada foi coletada como amostra para determinação do fluxo de sólidos, ou seja, as amostras de material flotado foram iguais à ‘população’ estatística*. Por 2h e 30 minutos cronometrados, *todo o material flotado foi coletado, pesado em polpa e depois pesado a seco*, o que concedeu uma precisão de vazão muito grande para estes produtos. Juntamente com os demais dados, e em particular com os valores de teor, *este conjunto de dados para os balanços dos três ensaios foi completamente redundante, o que aumenta muito a robustez dos dados calculados*.

As tabelas de resultados também incluem o teor de calcopirita, calculado a partir do teor de cobre estimado pela reconciliação, utilizando a equação 3.3.

$$g_{m,gl}^* = \frac{g_{e,gl}^*}{\text{proporção do elemento } e \text{ no mineral } mrl} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

A proporção do elemento cobre na calcopirita é igual a 34,6%. Assim, o teor de calcopirita ($g_{m,gl}^*$) foi calculado pela divisão do teor de cobre estimado no balanço ($g_{e,gl}^*$) por 0,346.

Tabela 7.1 - Balanço de massas ensaio Cal 01 – 2 cm de espuma

Fluxos	Vazão de sólidos				Vazão de Polpa			Água	Teor de Cobre				Teor de Cpy
	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Recuperação	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Valores Estimados	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Recuperação	Valores Estimados
	M_{gl} (g/min)	M_{gl}^* (g/min)			(g/min)	(g/min)		W_{gl}^* (g/min)	$g_{e,gl}$ (%)	$g_{e,gl}^*$ (%)		(%)	$g_{m,gl}^*$ (%)
Alim	115,0	110,3	4,1%	100,0%	350,7	364,1	3,8%	253,9	2,14	2,12	1,0%	100,0	6,1
Conc Rg 1	11,6	11,3	2,5%	10,3%	54,0	47,3	12,3%	36,0	16,84	17,56	4,3%	85,1	50,7
Rej Rg 1	100,2	98,9	1,2%	89,7%	310,5	316,8	2,0%	217,9	0,4	0,35	12,3%	14,9	1,0
Conc Rg 2	1,3	1,3	2,8%	1,2%	10,8	10,7	0,2%	9,4	15,91	16,58	4,2%	9,6	47,9
Rej Rg 2	101,9	97,6	4,2%	88,5%	332,9	306,1	8,1%	208,5	0,12	0,13	5,8%	5,3	0,4
Conc Sc	4,6	4,6	0,3%	4,1%	65,8	64,8	1,5%	60,3	1,47	1,48	0,4%	2,9	4,3
Rej Sc	91,0	93,0	2,2%	84,4%	244,9	241,3	1,5%	148,3	0,06	0,06	0,9%	2,4	0,2
Conc Cl	10,4	10,8	3,8%	9,8%	38,6	40,5	5,0%	29,7	19,54	19,00	2,7%	87,7	54,9
Rej Cl	1,8	1,9	2,8%	1,7%	16,6	17,5	5,8%	15,7	8,64	8,62	0,2%	7,0	24,9

Tabela 7.2 – Balanço de massas ensaio Cal 02– 3 cm de espuma

Fluxos	Vazão de sólidos				Vazão de Polpa			Água	Teor de Cobre				Teor de Cpy
	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Recuperação	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Valores Estimados	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Recuperação	Valores Estimados
	M_{gl} (g/min)	M_{gl}^* (g/min)			(g/min)	(g/min)		W_{gl}^* (g/min)	$g_{e,gl}$ (%)	$g_{e,gl}^*$ (%)		(%)	$g_{m,gl}^*$ (%)
Alim	119,4	118,1	1,1%	100,0%	351,8	366,7	4,3%	248,7	2,12	2,12	0,1%	100,0	6,1
Conc Rg 1	10,1	10,0	1,2%	8,5%	27,8	28,4	2,4%	18,4	20,48	20,55	0,3%	82,0	59,4
Rej Rg 1	115,8	108,1	6,7%	91,5%	352,4	338,3	4,0%	230,2	0,45	0,42	7,5%	18,0	1,2
Conc Rg 2	2,2	2,2	1,2%	1,9%	18,1	18,5	2,4%	16,3	13,68	13,75	0,5%	12,3	39,7
Rej Rg 2	107,2	105,8	1,3%	89,6%	323,2	319,8	1,1%	213,9	0,14	0,13	4,7%	5,7	0,4
Conc Sc	2,1	2,1	1,8%	1,8%	41,6	41,4	0,3%	39,3	3,18	3,20	0,7%	2,7	9,3
Rej Sc	98,8	103,7	5,0%	87,9%	277,2	278,3	0,4%	174,6	0,07	0,07	2,1%	3,0	0,2
Conc Cl	9,1	9,4	3,1%	7,9%	20,5	20,7	0,7%	11,3	21,25	21,61	1,7%	80,8	62,5
Rej Cl	2,9	2,9	0,8%	2,4%	28,5	26,3	7,7%	23,4	11,76	11,79	0,3%	13,6	34,1

Tabela 7.3 – Balanço de massas ensaio Cal 03– 4 cm de espuma

Fluxos	Vazão de sólidos				Vazão de Polpa			Água	Teor de Cobre				Teor de Cpy
	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Recuperação	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Valores Estimados	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Recuperação	Valores Estimados
	M_{gl}	M_{gl}^*						W_{gl}^*	$g_{e, gl}$	$g_{e, gl}^*$			$g_{m, gl}^*$
	(g/min)	(g/min)	$Med - Est / Med$		(g/min)	(g/min)		(g/min)	(%)	(%)		(%)	(%)
Alim	114,0	111,2	2,4%	100,0%	345,6	358,0	3,6%	246,8	2,12	2,12	0,2%	100,0	6,1
Conc Rg 1	8,5	8,7	2,4%	7,8%	20,9	20,6	1,4%	11,9	21,89	22,06	0,8%	81,6	63,8
Rej Rg 1	104,3	102,5	1,7%	92,2%	339,8	337,4	0,7%	234,9	0,44	0,42	3,9%	18,4	1,2
Conc Rg 2	2,4	2,4	0,1%	2,2%	19,8	19,3	2,3%	16,9	11,89	12,09	1,7%	12,4	34,9
Rej Rg 2	104,2	100,1	3,9%	90,0%	325,6	318,1	2,3%	218,0	0,13	0,14	9,1%	6,0	0,4
Conc Sc	3,0	2,9	1,8%	2,6%	52,5	51,9	1,2%	48,9	2,29	2,27	0,8%	2,8	6,6
Rej Sc	100,9	97,2	3,6%	87,4%	282,6	266,2	5,8%	169,0	0,08	0,08	2,5%	3,2	0,2
Conc Cl	9,3	9,6	3,8%	8,7%	24,3	25,1	3,4%	15,5	21,38	21,27	0,5%	87,0	61,5
Rej Cl	1,4	1,5	3,1%	1,3%	14,1	14,8	5,2%	13,4	11,03	11,03	0,0%	7,0	31,9

Para todos os três ensaios, os dados ajustados pela reconciliação são muito próximos dos dados amostrados tanto para a vazão de sólidos, como para a vazão de polpa e o teor de cobre. A vazão de sólidos e o teor de cobre apresentaram resíduos mínimos, tipicamente abaixo de 5%. Resíduos acima de 5% para o teor de cobre referem-se apenas a teores de rejeito, de valor abaixo de 0,5% de cobre, em que o erro da análise química ocasiona diferenças relativas maiores, entretanto a diferença absoluta é inferior a 0,1 ponto percentual. Para a vazão de sólidos, em somente um fluxo, o rejeito rougher 1 do ensaio Cal 02, o resíduo foi superior a 5%. Estes resultados demonstram que a planta estava em regime permanente, comprovam que todas as amostras são muito confiáveis e bastante representativas do processo e indicam que a reconciliação foi muito bem sucedida, com resíduos muito pequenos. Esta condição é essencial para os desdobramentos dos balanços seguintes, porque determina o nível de erro para o balanço final em todos os níveis.

7.2 Resultados balanceados dos ensaios de calibração – Balanço por fração granulométrica

Para a realização dos balanços por fração granulométrica, foi utilizado o programa Bilco para os testes Cal 01 e Cal 03 e o Bilmat para o teste Cal 02. O uso de dois programas deveu-se apenas à disponibilidade de uso de cada um deles na época de execução dos balanços. Conforme o procedimento, *os resultados do balanço global* são os valores usados como os dados de entrada de vazão global de sólidos, de teor global de calcopirita e de vazão de água de cada fluxo.

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Seja considerado o ensaio Cal 03 como exemplo. Para o *concentrado rougher 1*, a vazão de sólidos estimada no primeiro balanço, M_{gl}^* , havia sido igual a 8,7 g/min como indicado na tabela 7.3. O teor de calcopirita estimado, $g_{m,gl}^*$, era igual a 63,8% e a vazão de água W_{gl}^* era igual a 11,92g/min. Estes valores foram utilizados como dados de entrada para o processo no programa Bilco, como dados globais (“bulk”). A eles, haviam sido associados desvios de somente 1-2% porque já representavam dados reconciliados e confiáveis.

Os dados de entrada da distribuição granulométrica correspondiam aos valores amostrados com os respectivos erros estimados de acordo com a qualidade da amostragem.

Deste modo, a reconciliação para este fluxo alterou muito pouco os valores globais, apenas o mínimo necessário para convergência. O processo efetivamente ajustou *as frações e os teores por fração* para que os resultados finais compostos de granulometria e teores por faixa fossem compatíveis com os dados globais já balanceados. Desta maneira, o nível de erro total foi mantido pequeno, dentro do nível do erro do balanço global. A tabela 7.4 apresenta os resultados para o concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03.

Os resíduos foram iguais a 1,4% para a vazão global e 2,4% para o teor de calcopirita. Como a vazão de água não sofre interferência de nenhuma característica do minério, não houve ajuste na vazão de água e o resíduo foi igual a zero.

Tabela 7.4 - Resultados do balanço por fração do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03.

Concentrado Rougher 1- Teste Cal 03						
	Valores Balanço Global M_{gl}^* (g/min)	Valores Reajustados M_{gl}^{**} (g/min)	Resíduos (%)			
Vazão de sólidos	8,7	8,6	1,4%			
Vazão de água	11,92	11,92	0,0%			
	(%)	(%)	(%)			
Teor de calcopirita	63,77	65,31	-2,4%			

Frações (µm)	% retida simples			Teor de calcopirita		
	Valores Medidos- ms_i (%)	Valores Estimados ms_i^{**} (%)	Resíduos	Valores Medidos - g_{mi} (%)	Valores Estimados g_{mi}^{**} (%)	Resíduos
212	8,1	7,6	5,4%	37,9	38,5	-1,6%
150	15,5	14,2	8,4%	52,0	51,0	2,0%
74	25,7	26,2	-2,1%	66,7	55,2	17,2%
44	15,3	17,2	-12,3%	80,3	73,7	8,2%
20	24,7	24,4	1,2%	89,6	84,6	5,6%
9	6,0	5,7	4,7%	89,0	84,8	4,7%
OF	4,8	4,7	2,5%	56,1	54,0	3,7%
Total	100,0	100,0		70,6	65,3	
Correlação R^2 entre os dados	0,988			0,965		
Correlação R^2 entre os dados, considerando também o ponto (0,0)	0,987			0,962		
Inclinação da linha de tendência que passa pelo ponto (0,0)	1,005			0,934		

Deste modo, a reconciliação do balanço foi alcançada, prioritariamente, por ajustes dos valores das frações. Especificamente para este concentrado, as alterações foram pequenas e os dados ajustados são bastante compatíveis com os dados amostrados, como mostram os valores de correlação, bastante altos, iguais a 0,988 e 0,965, respectivamente, para distribuição granulométrica e teores por fração. Os gráficos das figuras 7.1 e 7.2 ilustram esta comparação.

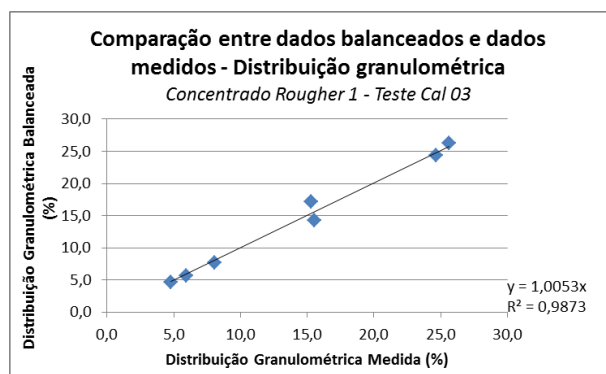


Figura 7.1 – Comparação entre dados de distribuição granulométrica balanceados e medidos para o concentrado rougher1 do ensaio Cal 03

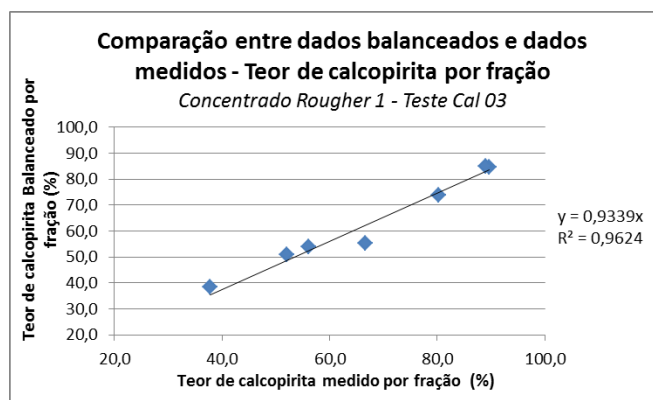


Figura 7.2 – Comparação entre dados de teores de calcopirita por fração granulométrica balanceados e medidos para o concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03

Para demonstrar a qualidade dos balanços por fração, os resultados do ensaio Cal 03 são ilustrados nas figuras 7.3 a 7.10 .

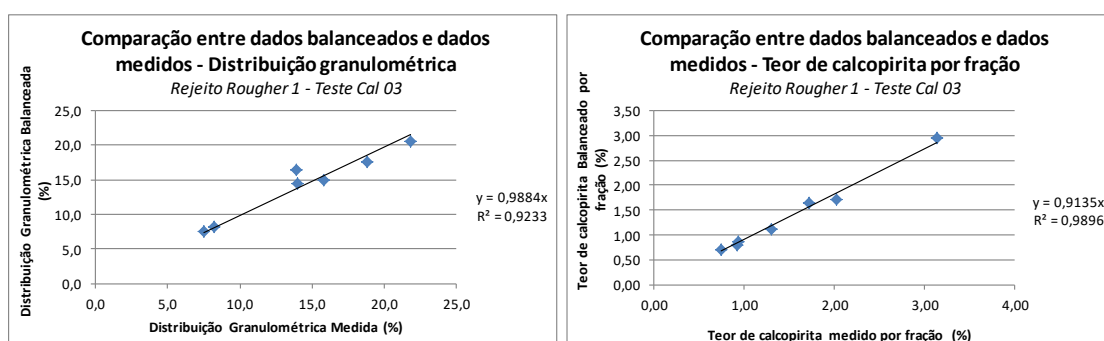


Figura 7.3 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o rejeito rougher1 do ensaio Cal 03

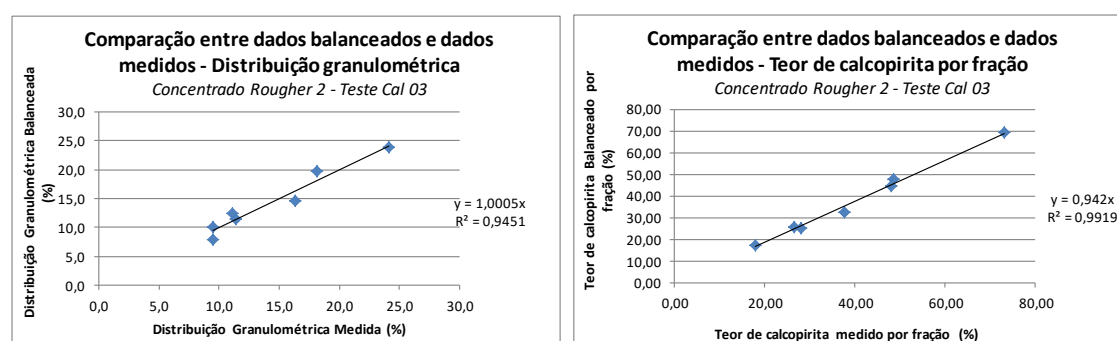


Figura 7.4 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o concentrado rougher 2 do ensaio Cal 03

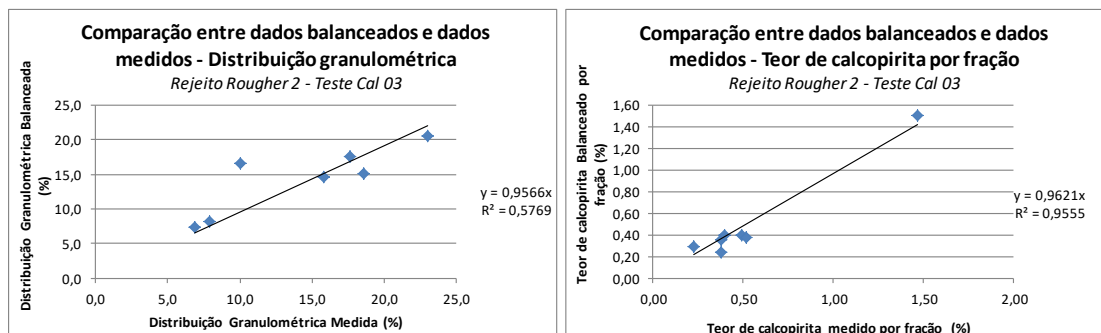


Figura 7.5 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o rejeito rougher 2 do ensaio Cal 03

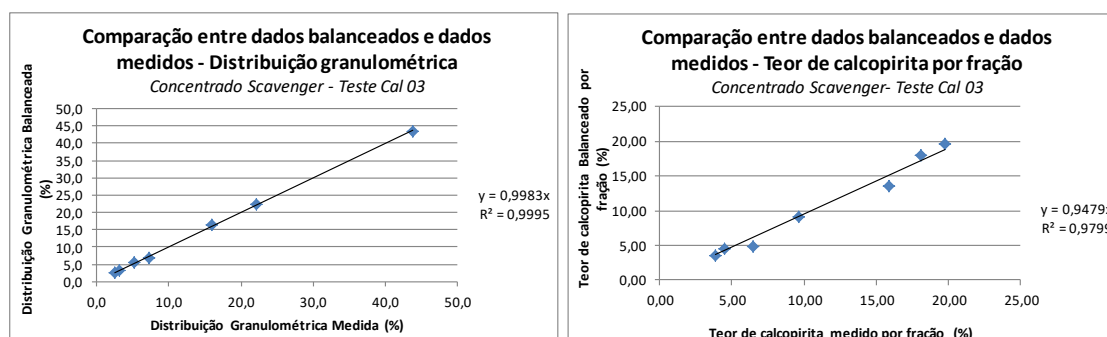


Figura 7.6 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o concentrado scavenger do ensaio Cal 03

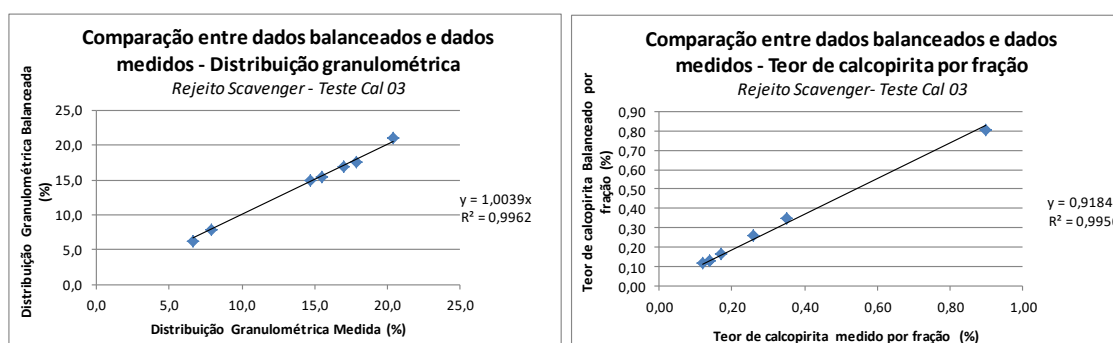


Figura 7.7 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o rejeito scavenger do ensaio Cal 03

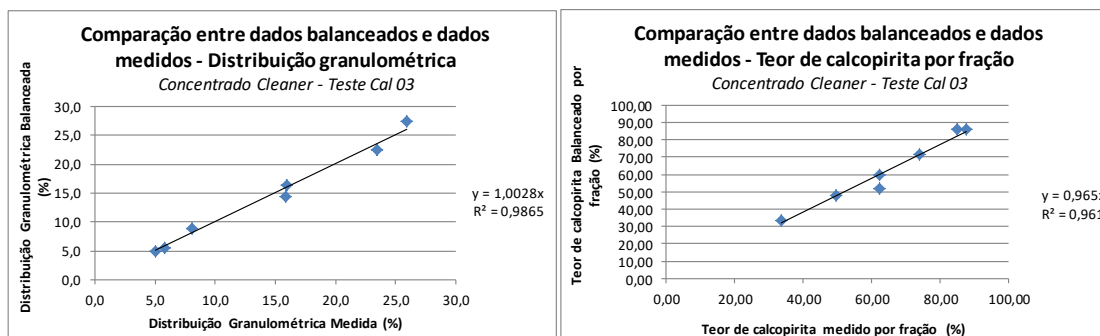


Figura 7.8 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o concentrado cleaner do ensaio Cal 03

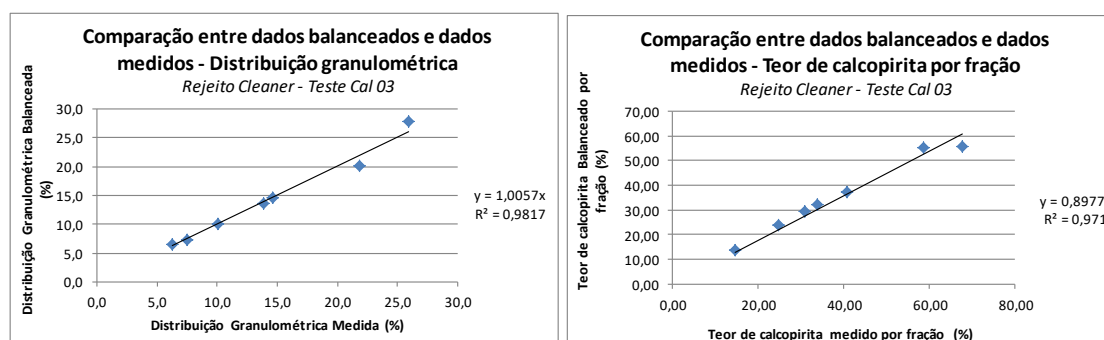


Figura 7.9 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para o rejeito cleaner do ensaio Cal 03

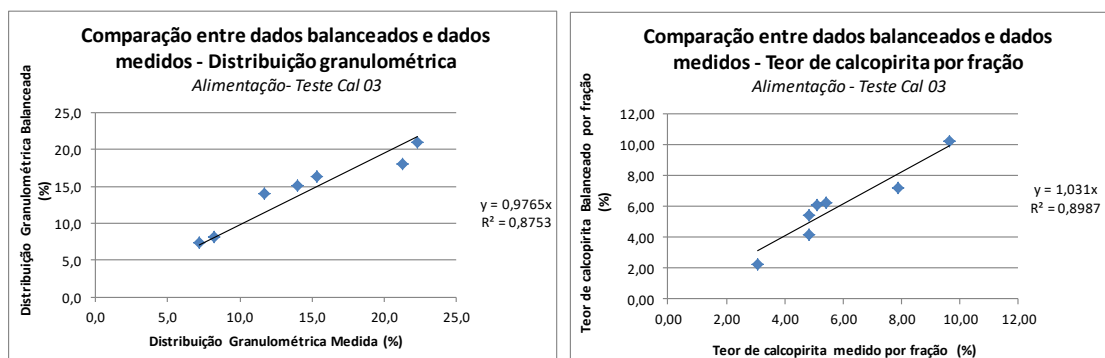


Figura 7.10 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para a alimentação do ensaio Cal 03

Para esta reconciliação, com uma única exceção, todos os fluxos apresentaram fatores de correlação acima de 0,85, e a vasta maioria, fatores de correlação superiores a 0,9 para uma comparação linear entre dados medidos e estimados, incluindo a origem. As linhas de tendência apresentaram inclinações muito próximas ao valor ideal de 1,0 sendo, em todos os casos, acima de 0,89. A figura 7.11 apresenta a comparação para todos os fluxos

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

do ensaio Cal 03 e as figuras 7.12 e 7.13 mostram as comparações de todos os fluxos do ensaio Cal 01 e Cal 02, respectivamente.

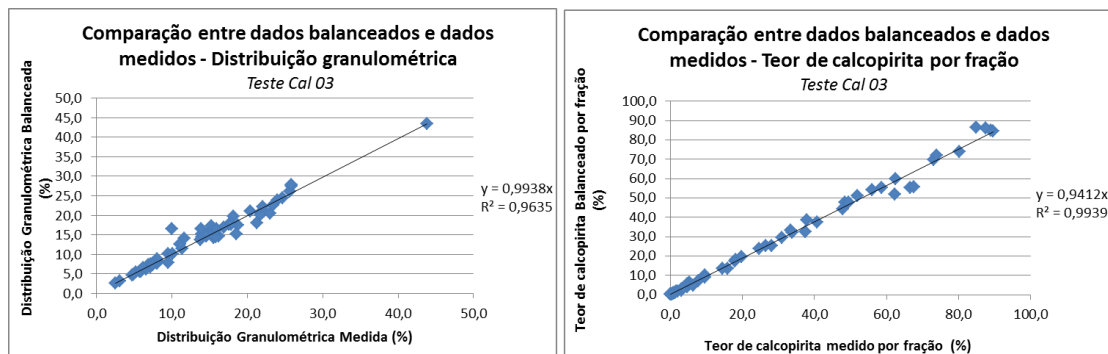


Figura 7.11 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para todos os fluxos do ensaio Cal 03

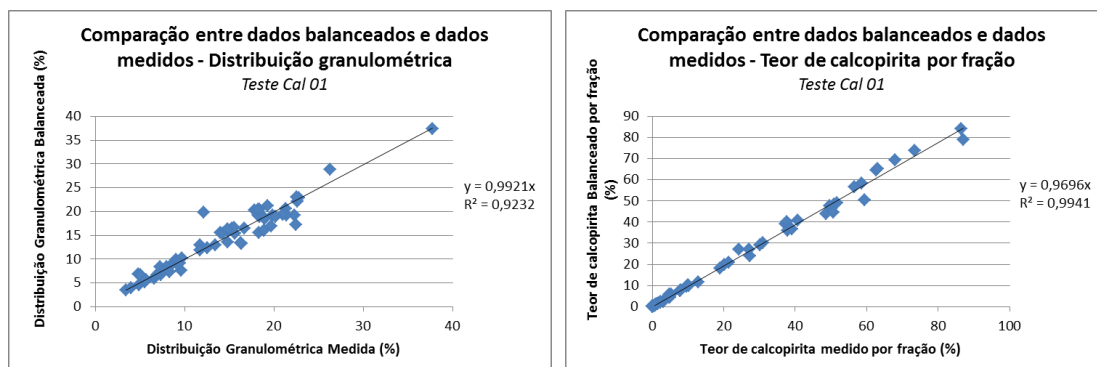


Figura 7.12 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para todos os fluxos do ensaio Cal 01

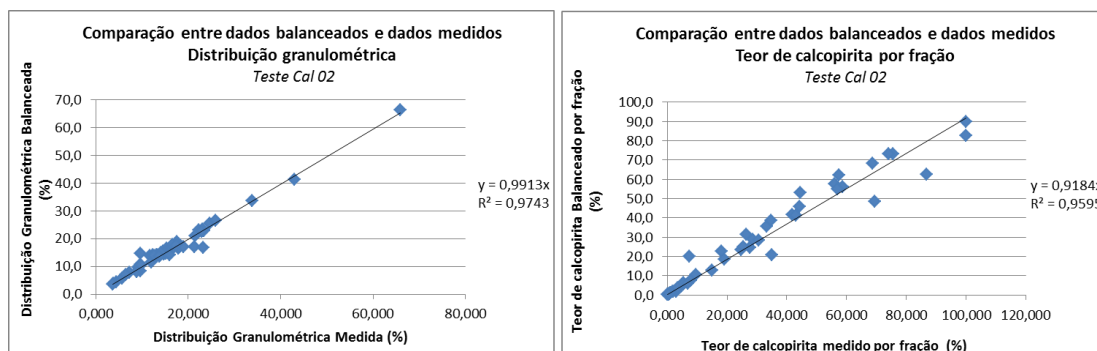


Figura 7.13 – Comparação entre dados balanceados e medidos de distribuição granulométrica e de teores de calcopirita para todos os fluxos do ensaio Cal 02

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Estes resultados atestam a qualidade do balanço por fração granulométrica, o que é essencial para a sequência de reconciliação.

7.3 Resultados balanceados dos ensaios de calibração – Balanço por classe de liberação

Além da alimentação, cuja análise foi comum a todos os ensaios, cada ensaio teve cinco produtos analisados pelo QEMScan – *concentrado rougher*, *rejeito rougher 2*, *concentrado scavenger*, *concentrado cleaner* e *rejeito cleaner*.

Para possibilitar os cálculos e ajustes da curva beta, as frações mais finas ($-20+9\mu\text{m}$ e OF do cyclosizer) foram *matematicamente* agrupadas, gerando somente uma fração fina, $-20\mu\text{m}$. Assim, cada produto permaneceu com seis frações de tamanho, retidos em 212, 150, 74, 44 e $20\mu\text{m}$ e a porção fina $-20\mu\text{m}$.

Deste modo, *em cada ensaio*, houve seis frações por amostra e seis amostras com dados de liberação determinados ou estimados pelo QEMScan por fração granulométrica, gerando 36 planilhas de cálculo de ajuste beta *diretamente a partir de dados medidos dos ensaios*. Além destas, para o rejeito rougher 1 e concentrado rougher 2, as planilhas de ajuste beta foram geradas a partir de cálculos e estimativas iniciais feitos utilizando-se o resultado do ajuste beta dos demais produtos e cálculos iniciais simples de balanço de massas. O conjunto de dados do ajuste beta é extenso, são 48 planilhas por ensaio, totalizando 144 planilhas.

A apresentação dos resultados no texto foi feita para *uma única fração de um produto de um ensaio*, com explicações de cada etapa de cálculo. Com a inclusão destas explicações, *o texto torna-se uma mescla de descrição de método de cálculo com apresentação de resultados*. Embora possa parecer mais uma descrição metodológica exemplificada do que uma apresentação de resultados, este formato foi a solução encontrada para expor os resultados de modo mais claro, já que os dados são muito inter-relacionados e requerem uma referência constante às fórmulas e procedimentos utilizados no método.

O balanço é feito em duas grandes etapas. A primeira é o ajuste da curva beta aos dados de liberação. A segunda é o próprio balanço utilizando as curvas ajustadas.

7.3.1 Ajuste da curva beta aos dados de liberação de cada fração de tamanho

A tabela 7.5 apresenta os resultados de análise mineralógica do QEMScan, juntamente com os dados de balanço de massas por fração granulométrica para o concentrado rougher 1 do ensaio Cal03.

Tabela 7.5– Resultados de **QEMScan** para o concentrado rougher 1 do ensaio Cal03

				Classes de liberação, j										
i	Tamanho partícula (mm)	% Retida	Teor balanceado de Cpy (% em massas)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				Classes de liberação, de acordo com o teor volumétrico de calcopirita indicado pelo QEMScan										
				0	0,1-10%	10-20%	20- 30%	30 - 40%	40 - 50%	50 - 60%	60 -70%	70 - 80%	80 - 90%	90-100%
				Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação por fração granulométrica (%)										
1	212	7,6	38,5	0,3	7,4	13,2	21,4	27,9	18,1	11,6	0,0	0,0	0,0	0,0
2	150	14,2	51,0	1,0	3,2	6,6	10,2	16,6	15,5	16,5	13,7	8,8	4,9	3,2
3	74	26,2	55,2	0,9	1,3	2,5	3,9	7,2	11,8	16,7	16,7	15,5	12,3	11,2
4	44	17,2	73,7	2,1	0,6	1,4	2,0	3,1	4,9	7,6	7,9	12,1	13,8	44,5
5	20	24,4	84,6	3,9	0,6	0,5	2,3	0,6	1,8	2,6	3,2	2,9	4,7	76,8
6	<20	10,4	70,9	29,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	70,8

Seja, então, considerada a fração -212+150µm do concentrado rougher 1 deste ensaio Cal03, cujo teor de calcopirita balanceado é igual a **51,0%**. A figura 7.14 reapresenta, para esta fração, os dados de distribuição de massas por classe, segundo o teor volumétrico da classe. Nesta figura, o quadrado vermelho indica a proporção de ganga que necessita ser removida para que a função beta possa ser aplicada às partículas mistas.

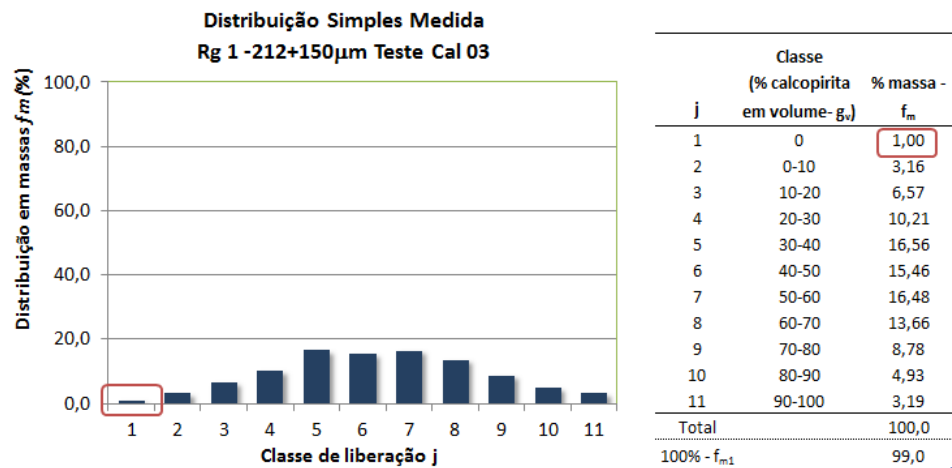


Figura 7.14 - Distribuição de massas por classe, segundo o teor volumétrico das classes para a fração - 212+150 µm, do concentrado rougher 1, ensaio Cal 03

A distribuição de partículas mistas foi obtida através da equação 3.11, para as classes j = 2 até 11.

$$f_{m \text{ mista},j} = \frac{f_{m,j}}{1 - f_{m,1}} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

e a figura 7.15 apresenta as distribuições simples e acumulada resultantes, sem ganga.

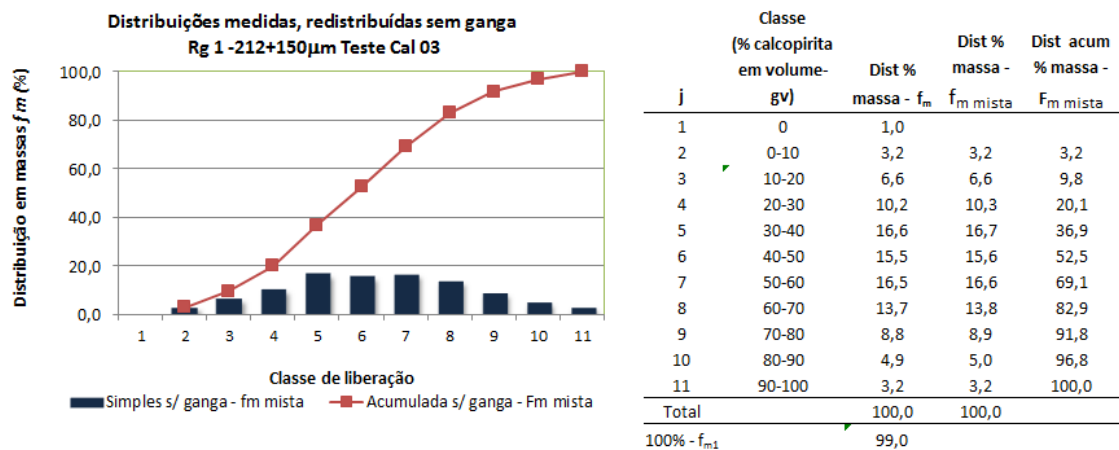


Figura 7.15 - Distribuição de massas por classe, segundo o teor volumétrico das classes para a fração - 212+150 µm, do concentrado rougher 1, ensaio Cal 03; dados medidos pelo QEMScan

O processo de ajuste requer a atribuição de um valor inicial dos parâmetros *a* e *b* da função beta. Neste caso, os valores de *a* e *b* receberam estimativas iniciais de 1,7 e 2,5 respectivamente. A partir destes dados, foram calculados os valores *iniciais* da

distribuição acumulada utilizando a curva beta e o valor de teor volumétrico superior up_j de cada classe (10%, 20%, etc).

$$F_{m\ mista,j}^{inicial} = Beta(1,7; 2,5; up_j) , \quad 2 < j < 11 \quad (Eq.3.15)$$

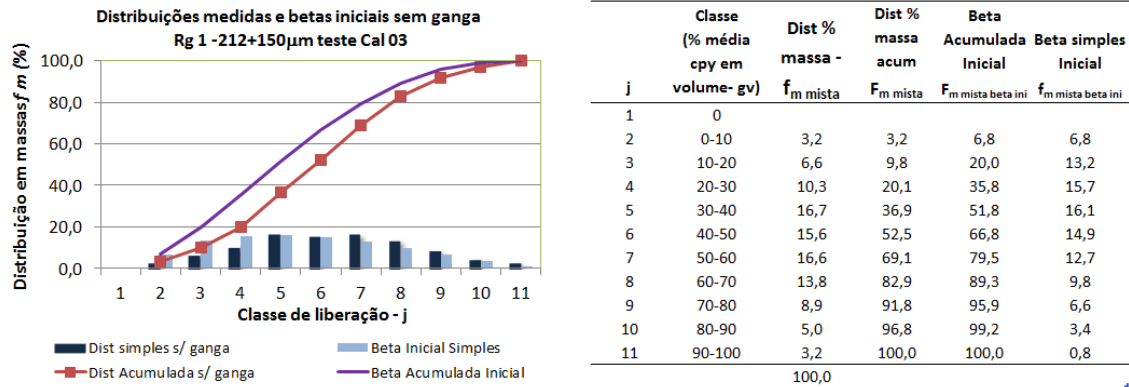


Figura 7.16 – Distribuições medidas e estimativas iniciais de curva beta para a distribuição de massas por classe, segundo o teor volumétrico das classes para a fração -212+150 µm do concentrado rougher 1, ensaio Cal 03

A partir da curva beta inicial acumulada, foi calculada a curva beta inicial simples. As somas dos quadrados das diferenças entre os valores de distribuição de liberação medidos e os valores das duas curvas beta calculadas (a simples e a acumulada), ambas divididas pelo número de classes mistas (10), constituíram os dois primeiros parâmetros de minimização para obtenção das curvas ajustadas, conforme equações 3.21 e 3.22.

$$S_1(a, b, \gamma) = \sum_{j=2}^{j=11} \left(f_{m\ mista,j}^{beta} - f_{m\ mista,j} \right)^2 / n \quad (Eq.3.21)$$

$$S_2(a, b, \gamma) = \sum_{j=2}^{j=11} \left(F_{m\ mista,j}^{beta} - F_{m\ mista,j} \right)^2 / n \quad (Eq.3.22)$$

A tabela 7.6 apresenta os resultados obtidos a partir das curvas beta iniciais. Note que os valores iniciais das somas S_1 e S_2 são iguais a 4,6 e 21,3. Estas somas dependem dos parâmetros a e b da curva beta e deverão atingir um mínimo após o ajuste da curva.

Tabela 7.6 - Soma dos quadrados das diferenças entre os valores das distribuições originais de partículas mistas e os valores das curvas beta calculadas para a fração -212+150 μm do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03

Classe j	Limites de classes por teores volumétricos cpy (%)	Distribuição em massa medida QEMScan (%)	Dist acumulada medida (%)	Dist simples sem ganga - $f_{m \text{ mista},j}$	Dist simples beta inicial sem ganga- $f_{m \text{ mista beta},j}$	Quadrados da Diferença de Distribuição simples	Dist acumulada sem ganga $F_{m \text{ mista},j}$	Dist acumulada beta inicial $F_{m \text{ mista beta},j}$	Quadrados da Diferença de Distribuição acumulada
1	0	1,0	1,0						
2	0-10	3,2	4,2	3,2	4,8	2,5	3,2	4,8	2,5
3	10-20	6,6	10,7	6,6	10,4	14,6	9,8	15,2	29,0
4	20-30	10,2	20,9	10,3	13,6	10,7	20,1	28,8	74,9
5	30-40	16,6	37,5	16,7	15,0	3,0	36,9	43,8	48,0
6	40-50	15,5	53,0	15,6	15,0	0,4	52,5	58,8	40,0
7	50-60	16,5	69,4	16,6	13,9	7,8	69,1	72,7	12,5
8	60-70	13,7	83,1	13,8	11,7	4,3	82,9	84,4	2,1
9	70-80	8,8	91,9	8,9	8,8	0,0	91,8	93,2	1,9
10	80-90	4,9	96,8	5,0	5,3	0,1	96,8	98,4	2,7
11	90-100	3,2	100,0	3,2	1,6	2,7	100,0	100,0	0,0
SOMA						46,0			213,5
						$S_1 = \Sigma / n$			$S_2 = \Sigma / n$
						4,6			21,3

Restava obter as duas outras somas a serem minimizadas.

Para obter uma estimativa inicial de ganga, foi atribuído ao fator γ um valor inicial de 0,3. A proporção de ganga foi calculada de acordo com a Eq 3.18. A distribuição inicial simples foi obtida a partir dos dados da distribuição mista.

$$f_{m,1}^{inicial} = f_{m,1} \cdot (1 + \gamma_{ini}) \quad (Eq.3.18)$$

$$f_{m,j}^{inicial} = f_{m \text{ mista},j}^{inicial} \cdot (1 - f_{m,1}^{inicial}), \quad 2 < j < 11 \quad (Eq.3.19)$$

Para um valor de γ inicial igual a 0,3, a tabela 7.7 apresenta os dados de distribuição completa recalculados para esta fração. A tabela 7.7 indica também a relação entre a distribuição e os três parâmetros, a , b , γ . Os valores apresentados são os obtidos com as estimativas iniciais destes fatores.

Tabela 7.7 - Dados da distribuição beta simples completa para a fração -212+150 μm do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03

j	Classe (% média cpy em massa- gm)	Dist % massa medida- f_m	Dist % massa - f_m mista	Dist % massa acum F_m mista	Beta Acumulada Inicial F_m mista beta ini	Beta simples Inicial f_m mista beta ini	Dist % massa recomposta f_m ini	Dist % massa recomposta acumulada F_m ini
1	0	1.0					1.3	1.3
2	8.7	3.2	3.2	3.2	6.8	6.8	6.7	8.0
3	20.3	6.6	6.6	9.8	20.0	13.2	13.0	21.1
4	32.1	10.2	10.3	20.1	35.8	15.7	15.5	36.6
5	43.2	16.6	16.7	36.9	51.8	16.1	15.9	52.5
6	53.5	15.5	15.6	52.5	66.8	14.9	14.7	67.2
7	63.2	16.5	16.6	69.1	79.5	12.7	12.6	79.8
8	72.2	13.7	13.8	82.9	89.3	9.8	9.7	89.5
9	80.6	8.8	8.9	91.8	95.9	6.6	6.5	95.9
10	88.5	4.9	5.0	96.8	99.2	3.4	3.3	99.2
11	95.1	3.2	3.2	100.0	100.0	0.8	0.8	100.0
		100.0	100.0					
					a ini = 1,7 b ini = 2,5		γ ini = 0,3	

A partir dos valores de a e b iniciais, também foi possível recalculer o teor volumétrico médio de cada classe para a distribuição beta estimada, conforme equação 3.5. Os dados são apresentados na tabela 7.8.

$$\bar{g}_{vlj} = \frac{a}{a+b} \cdot \frac{Beta(a+1, b, up_j) - Beta(a+1, b, lw_j)}{Beta(a, b, up_j) - Beta(a, b, lw_j)}, \quad 2 < j < 11 \quad (Eq.3.5)$$

Tabela 7.8 – Teores volumétricos calculados para a fração -212+150 μm do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03

Classe j	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0,0	0,0
2	5,0	6,4
3	15,0	15,3
4	25,0	25,1
5	35,0	35,0
6	45,0	45,0
7	55,0	54,9
8	65,0	64,8
9	75,0	74,7
10	85,0	84,4
11	95,0	93,2
Total	48,2	48,1

Os teores volumétricos médios iniciais de cada classe $\bar{g}_{vlj}$ foram transformados em teores mássicos $\bar{g}_{mlj}$ conforme equação 3.6.

$$\bar{g}_{mlj} = \bar{g}_{vlj} \cdot \frac{\rho_{\text{mineral}}}{\rho_j} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Onde ρ_j indica a densidade média da classe j. Para a fração granulométrica de -212+150 μm , especificamente, a densidade foi igual a 3,6 g/cm³. Considerando:

- a densidade da calcopirita pura como 4,3 g/cm³,
- que o minério é binário (composto de calcopirita e ganga) e
- que esta fração contém 51% de calcopirita,

por álgebra simples obtém-se que a densidade média de ganga é igual a 3,0 g/cm³. Deste modo, a densidade de cada classe pode ser estimada como sendo igual à ponderação dos teores das classes em relação às densidades de ganga, neste caso, equivalente a 3,0 g/cm³, e de calcopirita pura, igual a 4,3g/cm³. A tabela 7.9 apresenta as densidades e os teores mássicos iniciais das classes.

Tabela 7.9 - Teores mássicos iniciais das classes e o teor total para a fração -212+150 μm do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03

Classe j	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Teor mássico médio beta inicial cpy
1	0,0	0,0	3,0	0,0
2	5,0	6,4	3,1	8,7
3	15,0	15,3	3,2	20,3
4	25,0	25,1	3,4	32,1
5	35,0	35,0	3,5	43,2
6	45,0	45,0	3,6	53,5
7	55,0	54,9	3,7	63,2
8	65,0	64,8	3,9	72,2
9	75,0	74,7	4,0	80,6
10	85,0	84,4	4,1	88,5
11	95,0	93,2	4,2	95,1

Com os teores mássicos médios e a distribuição simples estimada com a curva beta, obteve-se o teor da fração -212+150 μm pela ponderação dos teores mássicos e da distribuição beta inicial, mostrados na tabela 7.10.

Tabela 7.10 - Teor de calcopirita calculado a partir da distribuição inicial para a fração -212+150 μm do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03

Classe j	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta inicial cpy (%)
1	1,3	0,0
2	4,7	8,7
3	10,3	20,3
4	13,4	32,1
5	14,8	43,2
6	14,8	53,5
7	13,7	63,2
8	11,6	72,2
9	8,7	80,6
10	5,2	88,4
11	1,6	95,1
Total	100,0	51,20

O quadrado da diferença entre o valor deste teor calculado com a curva beta (somatório de $\bar{g}_{mj} \cdot f_{mj}^{beta} = 51,2\%$) e o teor balanceado da fração -212+150 μm ($g_{mi}^{**} \text{ balanço} = 51,0\%$) corresponde ao terceiro e mais importante parâmetro de minimização, como apresentado na equação 3.23.

$$S_3(a, b, \gamma) = \left(g_{m i \text{ balanço}} - \sum_{j=1}^{11} (\bar{g}_{mj} \cdot f_{mj}^{beta}) \right)^2 \quad (Eq. 7.23)$$

Como este valor de $S_3 = 0,2^2$ se mostrou numericamente baixo em comparação com o valor inicial das somas S_1 e S_2 , ele foi multiplicado por um fator, $\zeta = 20$, conforme o procedimento explicado no capítulo 3. Esta multiplicação e a própria escolha do fator multiplicativo visaram dar um peso numericamente relevante ao teor em relação ao ajuste dos dados individuais de mineralogia, já que os dados de teor dos balanços anteriores estão seguramente mais corretos do que os dados de mineralogia, sujeitos a grandes desvios estereológicos.

O último parâmetro de minimização é o quadrado da diferença entre o valor medido da distribuição da ganga (1,0%) com o valor estimado utilizando-se o parâmetro γ (1,3% – ver tabela 7.7), como mostrado na equação 3.24:

$$S_4(a, b, \gamma) = (f_{m,1}^{inicial} - f_{m,1})^2 \quad (Eq. 7.24)$$

Novamente, como este valor inicial de $S_4 = 0,3^2$ foi muito pequeno frente ao valor dos dois primeiros parâmetros de ajuste, foi utilizado um fator multiplicativo, η , neste caso igual a 5. Assim, especificamente para esta fração deste produto, a função de minimização foi igual a:

$$Min Z = S_1(a, b, \gamma) + S_2(a, b, \gamma) + 20 S_3(a, b, \gamma) + 5 S_4(a, b, \gamma) \quad (Eq. 7.25)$$

A minimização do somatório Z das quatro somas quadráticas através de ajustes em a , b e γ pelo método dos mínimos quadrados permitiu determinar os valores ótimos de a , b e γ , garantindo que a curva final fosse a que melhor se ajustasse aos valores medidos de distribuição das classes de liberação, à proporção de ganga medida e, principalmente, ao teor balanceado.

Convém notar que o ajuste destes parâmetros automaticamente ajusta todos os valores que sejam deles dependentes, o que inclui as distribuições e os teores mássicos de cada classe. Como em todo o cálculo iterativo, os valores iniciais deixam de existir e dão lugar

aos valores ajustados. A figura 7.17 compara as distribuições. A tabela 7.11 sumaria os principais resultados para esta fração, incluindo os valores de a , b e γ .

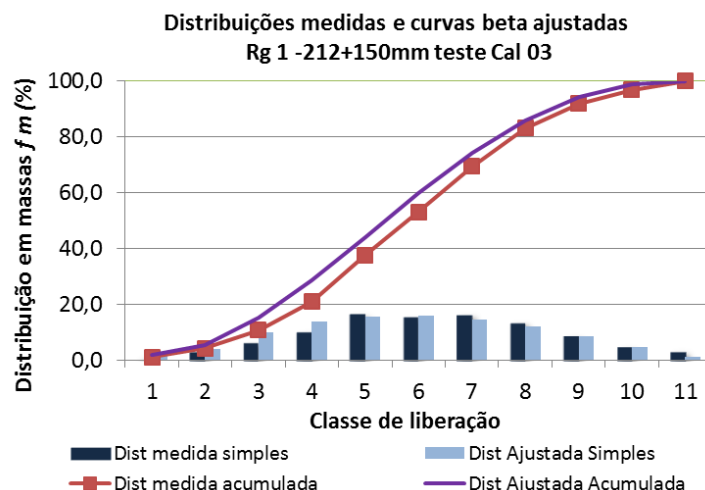


Figura 7.17 – Comparação entre as distribuições de liberação medidas e as distribuições calculadas com a curva de ajuste beta para a fração -212+150 μm do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03

Tabela 7.11 – Distribuição em massas por liberação ajustada para a fração -212+150 μm do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03

j	Classe (% média cpy em volume- gv)	Dist % massa medida- f_m	Dist % massa - f_m mista	Dist % massa acum F_m mista	Beta acumulada Inicial	Beta simples Inicial	Dist % massa ajustada	Dist % massa acumulada ajustada	Teor mássico médio beta ajustado cpy (%)
1	0,0	1,0					1,6	1,6	0,0
2	0-10	3,2	3,2	3,2	3,8	3,8	3,7	5,3	9,0
3	10-20	6,6	6,6	9,8	13,6	9,8	9,7	15,0	20,5
4	20-30	10,2	10,3	20,1	27,4	13,8	13,6	28,5	32,2
5	30-40	16,6	16,7	36,9	43,1	15,7	15,5	44,0	43,2
6	40-50	15,5	15,6	52,5	59,1	15,9	15,7	59,7	53,5
7	50-60	16,5	16,6	69,1	73,6	14,6	14,4	74,1	63,2
8	60-70	13,7	13,8	82,9	85,7	12,0	11,8	85,9	72,2
9	70-80	8,8	8,9	91,8	94,2	8,5	8,4	94,3	80,6
10	80-90	4,9	5,0	96,8	98,8	4,6	4,6	98,9	88,3
11	90-100	3,2	3,2	100,0	100,0	1,2	1,1	100,0	94,9
		100,0	100,0						51,3
					$a = 2,01$ $b = 2,45$	$\gamma = 0,59$			

O teor final estimado para a fração granulométrica a partir da ponderação do teor médio de cada classe e a distribuição de liberação simples, igual a 51,3%, está bastante próximo do teor calculado pelo balanço por fração, 51,0%. Esta diferença é mínima, conforme exigido pelo próprio procedimento de minimização. O ajuste beta também apresentou

resultados bastante compatíveis com os dados medidos, o fator de correlação R^2 para a distribuição completa foi igual a 0,89. Os gráficos da figura 7.18 comparam os dados medidos com os dados estimados para esta fração de -212+150 μm do concentrado rougher 1.

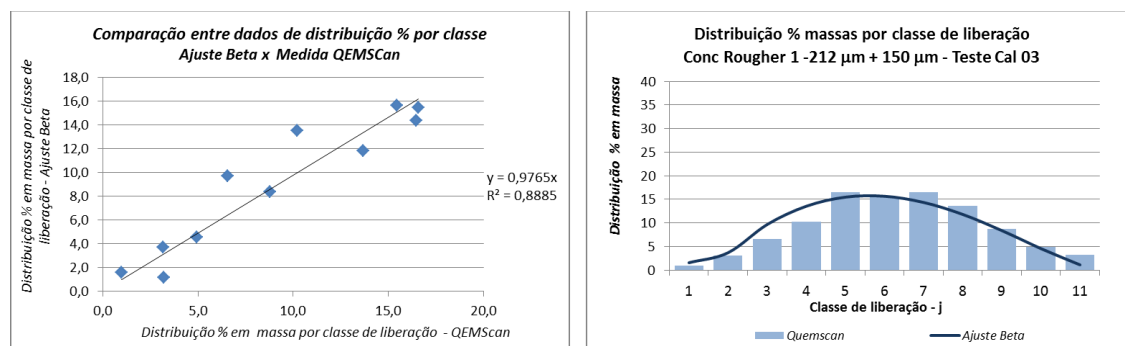


Figura 7.18 – Comparação entre a distribuição de liberação medida e a calculada com a curva de ajuste beta para a fração -212+150 μm do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03

Um processo similar foi feito para cada fração de cada produto de cada ensaio. Para cada produto, as distribuições beta, juntamente com os teores calculados por fração a partir da curva, foram consolidadas em uma tabela contendo também os dados balanceados de granulometria e teor por fração, como mostra a tabela 7.12 para o concentrado Rougher 1 do ensaio Cal 03. Esta tabela permite ver que os teores calculados para a fração obtidos após o ajuste da curva beta são próximos aos teores balanceados por fração, conforme determinado pelo procedimento. Assim, o ajuste da curva beta realizou um processo que compensou os desvios estereológicos tornando os dados de mineralogia compatíveis com os dados de teor balanceados por fração granulométrica.

Tabela 7.12 – Ajuste BETA da distribuição em massas por liberação para a fração -212+150 μm do concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03

Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela liberação (%)	Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
				0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
				Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
212	7,6	38,5	36,6	1,0	3,4	16,8	25,8	24,4	16,6	8,3	2,9	0,6	0,1	0,0
150	14,2	51,0	51,4	1,6	3,7	9,7	13,6	15,5	15,7	14,4	11,8	8,4	4,6	1,1
74	26,2	55,2	56,2	2,5	5,6	8,6	10,1	10,9	11,4	11,6	11,5	10,9	9,8	7,0
44	17,2	73,7	73,8	3,3	2,9	3,7	4,2	4,7	5,4	6,2	7,4	9,2	12,8	40,2
20	24,4	84,6	81,6	5,5	2,0	1,9	2,0	2,2	2,5	2,9	3,5	4,7	7,3	65,4
-20	10,4	70,9	68,5	29,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	70,7

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Na etapa seguinte, o balanço de massas das classes de liberação é que prosseguiu ajustando estas distribuições de tal modo que o teor calculado pela mineralogia se tornasse igual ao teor balanceado por fração.

A figura 7.19 apresenta uma comparação geral entre os resultados do ajuste beta e os resultados medidos para o ensaio Cal 03. As figuras 7.20 e 7.21 apresentam esta mesma comparação para os ensaios Cal 01 e Cal 02.

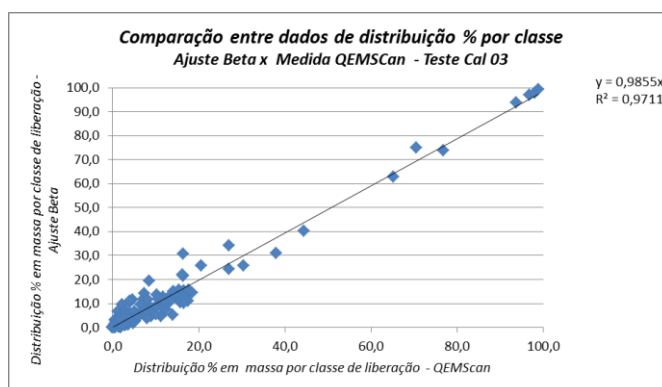


Figura 7.19 – Comparação entre a distribuição de liberação medida e a calculada com a curva de ajuste beta para os produtos do ensaio Cal 03

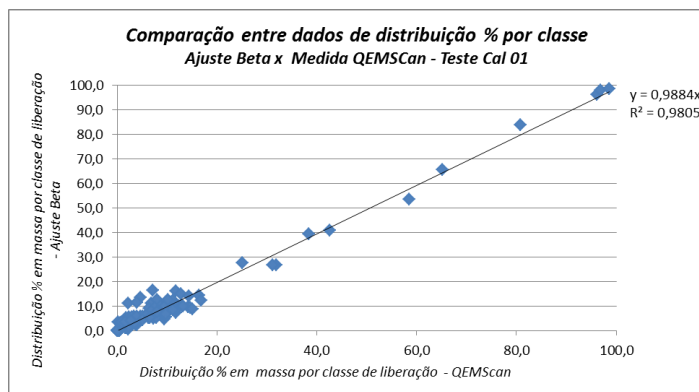


Figura 7.20 – Comparação entre a distribuição de liberação medida e a calculada com a curva de ajuste beta para os produtos do ensaio Cal 01

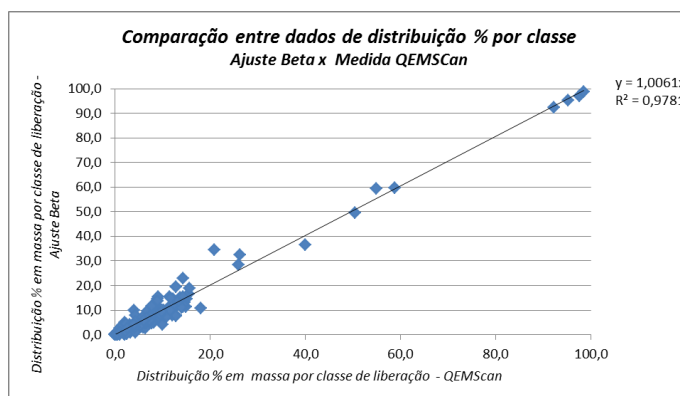


Figura 7.21 – Comparação entre a distribuição de liberação medida e a calculada com a curva de ajuste beta para os produtos do ensaio Cal 02

7.3.2 Balanço por classes de liberação a partir dos dados das curvas beta

O conjunto de dados dos ensaios foi balanceado num processo feito fração por fração reajustando as distribuições beta para que os teores calculados para a fração a partir dos dados de distribuição da classe fossem iguais ao teor balanceado da fração.

O fato de que estes teores tenham que ser *iguais* - e não apenas próximos - dificulta muito o uso de programas usuais de reconciliação de balanços. Isto porque os programas de balanço utilizam, em geral, métodos que requerem flexibilidade de alteração nos parâmetros consolidados. Matematicamente falando, para o teor consolidado da fração granulométrica, deveria ser atribuído um valor de desvio Δ , um intervalo de variação, o que é tipicamente o caso dos balanços convencionais, em que há erros de amostragem. Como neste caso o processo é inverso e o teor consolidado tem de ser igual ao teor previamente balanceado, isto significaria atribuir a este parâmetro de teor consolidado um valor fixo, igual ao valor previamente balanceado por fração, e sem variação alguma, ou seja, $\Delta=0$.

Assim, o uso de planilha de cálculo para fechamento é uma opção enquanto não há um programa computacional apto realizar este processo completo.

O ajuste anterior da curva beta auxilia significativamente o fechamento. Na planilha, é necessário modificar paulatinamente os dados da distribuição de cada classe para garantir a reconciliação em todos os níveis, como mostrado na figura 3.12.

As tabelas 7.13 a 7.15 apresentam os resultados deste balanço para os fluxos de alimentação, concentrado rougher 1 e rejeito rougher 1 do ensaio Cal 03. Os demais fluxos são apresentados nos Anexos.

Tabela 7.13 - Dados reconciliados da **alimentação** do ensaio Cal 03

Alimentação		
Vazão Massas (g/min)	Teor calcopirita (%)	
112,0	6,2	
Recup Massa (%)	Recup Cpy (%)	
100,0%	100,0%	

Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita														Total
0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%				
Tamanho (µm)	% Retida	Teor Cpy (%)	Distribuição % em massa por classe de liberação em cada fração granulométrica											
212	14,0	2,3	83,8	10,9	1,6	1,3	1,1	0,7	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	100,0
150	16,3	4,2	88,4	3,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,0	0,8	0,5	0,3	0,1	100,0
74	21,0	6,3	86,8	2,0	1,7	1,6	1,5	1,5	1,3	1,2	1,0	0,8	0,6	100,0
44	15,1	7,2	88,7	1,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	1,2	3,4	100,0
20	18,0	10,3	87,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9	1,3	7,2	100,0
<20	15,5	5,8	93,3	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	4,6	100,0
Total	100,0	6,2												

Tabela 7.14 - Dados reconciliados do **concentrado rougher 1** do ensaio Cal 03

Concentrado Rougher 1														
Vazão Massas (g/min)	Teor calcopirita (%)													
8,6	65,3													
Recup Massa (%)	Recup Cpy (%)													
7,7%	81,2%													
		Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita												
		0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	Total	
Tamanho (um)	% Retida	Teor Cpy (%)	Distribuição % em massa por classe de liberação											
212	7,6	38,5	0,7	3,4	18,4	25,2	23,2	16,1	9,1	3,0	0,8	0,1	0,0	100,0
150	14,2	51,0	0,8	4,8	9,3	13,8	15,9	16,0	14,5	11,8	8,0	3,7	1,3	100,0
74	26,2	55,2	2,4	4,7	8,4	11,2	12,6	12,8	12,2	11,4	10,0	8,3	6,0	100,0
44	17,2	73,7	2,9	3,1	3,8	4,3	4,9	5,5	6,4	7,6	9,4	13,0	39,2	100,0
20	24,4	84,6	4,1	0,8	1,2	1,6	2,1	2,6	3,3	4,5	6,0	9,2	64,9	100,0
<20	10,4	70,9	26,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	73,1	100,0
Total	100,0	65,3												

Tabela 7.15 - Dados reconciliados do **rejeito rougher 1** do ensaio Cal 03

Rejeito Rougher 1													
Vazão Massas (g/min)	Teor calcopirita (%)												
103,4	1,3												
Recup Massa (%)	Recup Cpy (%)												
92,3%	18,8%												
		Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
		0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
Tamanho (μm)	%Retida	Teor Cpy (%)	Distribuição % em massa por classe de liberação										
212	14,5	0,7	87,4	11,2	0,8	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
150	16,5	0,8	94,7	3,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	100,0
74	20,6	1,1	95,7	1,7	1,0	0,5	0,3	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	100,0
44	15,0	0,9	96,9	1,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	100,0
20	17,5	1,7	97,0	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	100,0
<20	15,9	2,3	97,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	100,0
Total	100,0	1,3											

A tabela 7.16 apresenta os teores médios de cada classe em cada tamanho de partícula que foram reconciliados a partir da ponderação dos teores médios das classes dos diversos produtos na respectiva fração de tamanho.

Tabela 7.16 – Teores mássicos médios de calcopirita reconciliados para cada fração de tamanho, após ajuste beta

	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Tamanho (μm)	Teores mássicos médios de calcopirita calculados para cada fração após ajuste beta										
212	0%	3%	19%	31%	43%	53%	62%	71%	80%	87%	94%
150	0%	7%	20%	32%	44%	54%	64%	72%	81%	89%	96%
74	0%	7%	20%	32%	44%	54%	64%	73%	81%	88%	95%
44	0%	6%	19%	31%	43%	53%	63%	72%	80%	88%	97%
20	0%	7%	20%	32%	43%	54%	63%	72%	81%	89%	97%
-20	0%	9%	21%	32%	43%	53%	62%	72%	80%	88%	97%

Os dados de distribuição mineralógica balanceados foram próximos aos dados estimados pela curva beta. De fato, a abordagem de reconciliação simultânea com a correção mineralógica viabiliza o balanceamento que, de outro modo, seria impossível. As figuras 7.22 a 7.24 comparam os dados de distribuição obtidos após o balanço com os dados de ajuste beta.

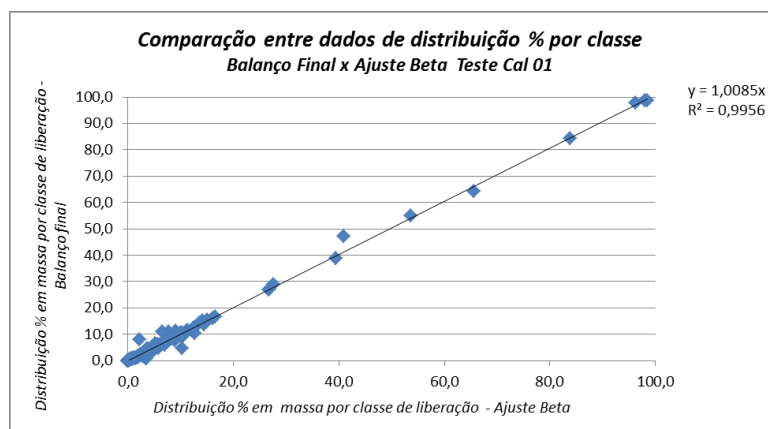


Figura 7.22 – Comparação entre a distribuição de liberação balanceada e a calculada com a curva de ajuste beta para os produtos do ensaio Cal 01

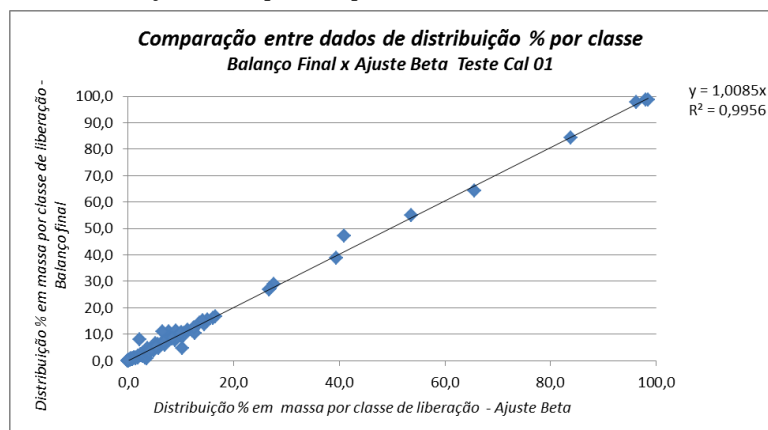


Figura 7.23 – Comparação entre a distribuição de liberação balanceada e a calculada com a curva de ajuste beta para os produtos do ensaio Cal 02

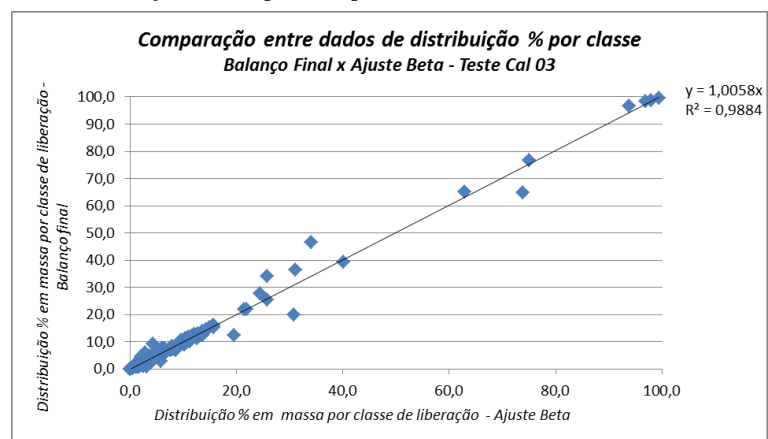


Figura 7.24 – Comparação entre a distribuição de liberação balanceada e a calculada com a curva de ajuste beta para os produtos do ensaio Cal 03

7.3.3 Erros

A propagação de erros é uma das principais preocupações quando amostras são segmentadas e submetidas a análises por frações e subfrações.

Especificamente no caso da presente tese e do método de Savassi, a hierarquia com que os balanços são realizados faz com que o valor dos erros Δ seja determinado pelos primeiros balanços. Como todo o ensaio e as amostragens são fisicamente conduzidos para que os primeiros balanços tenham os menores erros possíveis e os valores determinados nestes balanços são mantidos nos seguintes, então os valores de erros globais são efetivamente baixos. Os balanços nos níveis seguintes devem, necessariamente, conduzir a valores com erros pequenos e que sejam compatíveis com os dados amostrados. Desta forma, se o erro do balanço global é pequeno e o valor do balanço global é mantido na determinação do balanço por fração, então, este baixo desvio global determina que os erros do balanço por fração sejam, necessariamente, baixos. Neste sentido, o Δz , *pré-determinado e pequeno pelo método e forma de amostragem*, **condiciona** os erros das variáveis dos subníveis a serem baixos.

Sendo assim, a análise de erros **não** segue o padrão convencional de análise que compara os dados amostrados com os dados calculados. Os valores calculados devem ser vistos como os valores que apresentam, ao mesmo tempo, a máxima probabilidade de compatibilidade:

- com os dados amostrados;
- com todas as restrições do balanço de massas,
- e, *principal e predominantemente*, com os valores dos balanços anteriores, resguardados os níveis de erros destes balanços.

Embora este ainda seja um problema de mais de uma solução, o conjunto de dados que segue todas estas condições é restrito. Deste modo, a probabilidade de que o conjunto de dados calculados seja uma representação adequada da realidade é elevada.

Capítulo 8 - Resultados - Parte 3

Avaliação do Modelo dos Compartimentos – Etapa Rougher

Na minha dissertação de mestrado (Santos, 2014), os resultados globais de teor e recuperação de calcopirita foram avaliados predominantemente para a etapa rougher 1, porque nesta etapa havia sido realizada a variação da altura de espuma (2, 3 e 4 cm), que era o que permitia avaliar o efeito da recuperação na espuma e determinar este parâmetro isoladamente e, assim, compor o modelo completo. Os modelos foram aplicados de modo particular a esta etapa e possibilitaram a representação adequada do comportamento da flotação neste estágio.

Nesta tese de doutorado, os mesmos ensaios são avaliados por classes de tamanho e liberação e, além da etapa rougher, o circuito inteiro é avaliado. Para melhor organizar a discussão, este capítulo estará focado **apenas na etapa rougher**. Os resultados serão apresentados em relação ao minério global, reproduzindo parte dos resultados da dissertação de mestrado (Santos 2014), e, em seguida, por granulometria e por classe de liberação.

8.1 Avaliação do rougher 1, produto global (“bulk”)

A tabela 8.1 e a figura 8.1 resumem os principais resultados de processo da etapa rougher dos ensaios de calibração, com 2, 3 e 4 cm de espessura de espuma.

Tabela 8.1– Principais resultados globais de processo da etapa rougher dos ensaios de calibração com diferentes alturas de espuma

Etapa	Teste	Altura de Espuma no Rougher 1	Tempo de Retenção ar na espuma (s)	% de sólidos na espuma	Vazão Minério Alimenta-ção	Vazão água Alimenta-ção	Massa Sólidos Recuperada	Recup Massa Bal Comp	Teor Cpy Conc Bal Comp	Recup Cpy Bal Comp	Recup Água (Rw)
		cm			g/min	g/min	g/min		%		%
Rg1	Cal 1	2	2,8	24%	110,3	253,9	11,3	10,1%	51,1	84,7%	14,2%
	Cal 2	3	4,2	35%	118,1	248,7	10,0	8,7%	58,4	82,2%	7,4%
	Cal 3	4	5,2	42%	111,2	246,8	8,7	7,7%	65,3	81,2%	4,8%

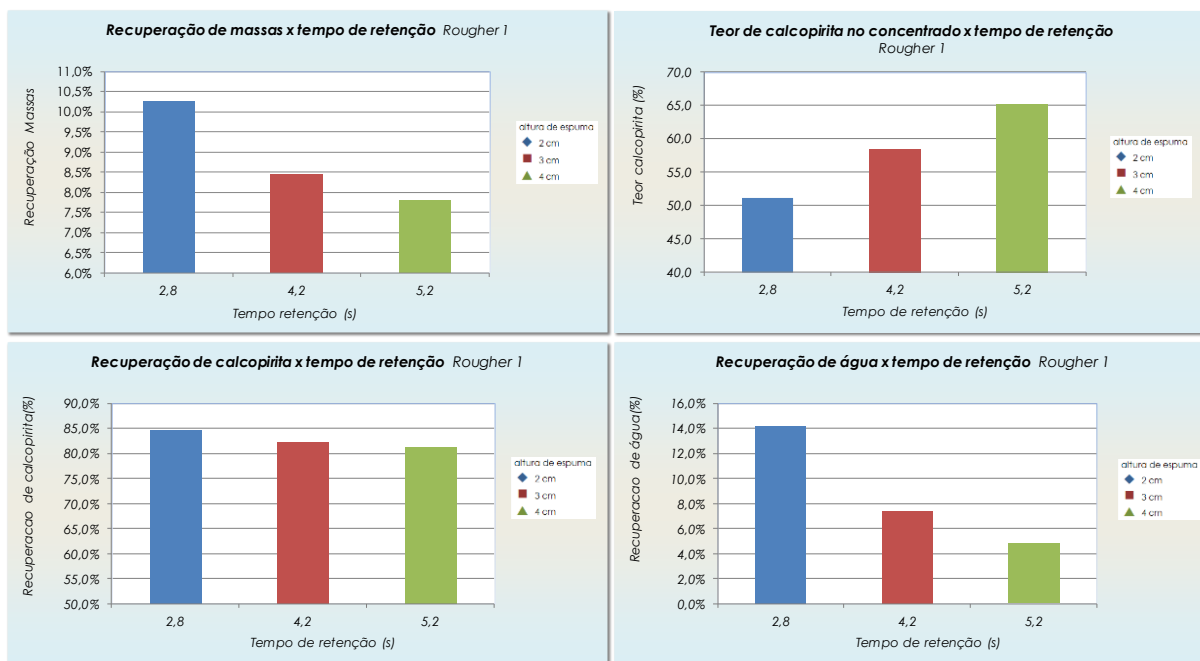


Figura 8.1- Gráficos de teor de calcopirita e de recuperações de massa, de calcopirita e de água em função do tempo de retenção do ar na espuma para o rougher 1

A mudança na altura da camada de espuma no primeiro rougher provocou alterações significativas na recuperação de massas neste estágio, que reduziu de 10,1% para 7,7% quando a espessura de espuma passou de 2 para 4 cm (ou o tempo de retenção do ar na espuma passou de 2,8 para 5,2 s). Em contrapartida, o teor de concentrado subiu de 51,1% para 65,3% de calcopirita. Em consequência, houve redução na recuperação de

calcopirita num nível modesto, de 85% para aproximadamente 81%. Estes dados são apresentados na tabela 8.2 e no gráfico da figura 8.2.

Tabela 8.2 – Recuperações de massas e conteúdo de calcopirita no concentrado rougher dos testes de calibração com diferentes alturas de espuma

Teste	Altura de espuma (cm)	Tempo retenção ar na espuma (s)	Recuperação de Massas (%)	Teor Calcopirita (%)	Recuperação de Calcopirita (%)	Porção da recuperação de massas	
						Calcopirita	Ganga
Cal 01	2	2,8	10,1%	51,10	84,7%	5,2%	4,9%
Cal 02	3	4,2	8,7%	58,44	82,0%	5,1%	3,6%
Cal 03	4	5,2	7,7%	65,31	81,2%	5,0%	2,7%

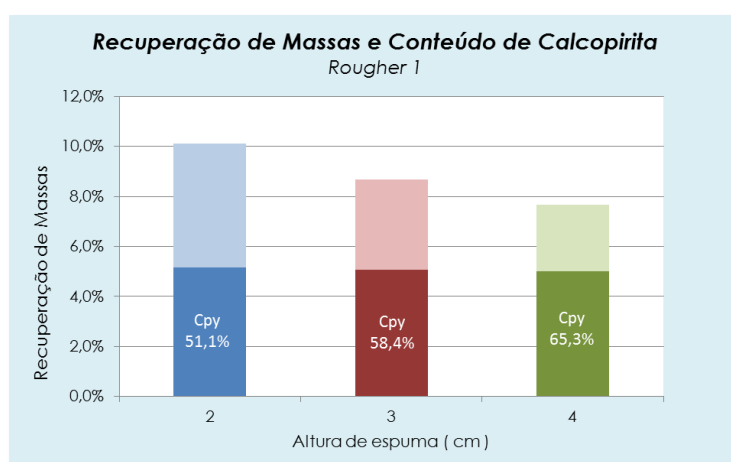


Figura 8.2- Gráficos de recuperação de massas e conteúdo de calcopirita em função da espessura de espuma para o rougher 1

A altura total das barras corresponde à recuperação de massas e a altura da porção em cores mais fortes representa o conteúdo de calcopirita recuperado (teor x massa). Os rótulos em cada barra apresentam o teor de calcopirita em cada ensaio

Pela figura 8.2, nota-se que a redução na recuperação de massas está diretamente associada ao menor transporte de ganga para o concentrado. De fato, **a quantidade de calcopirita flotada é muito próxima nos três casos**, apresentando redução muito pequena. Esta maior remoção de ganga mantendo a flotação de um conteúdo de calcopirita relativamente similar equivale a um aumento expressivo de seletividade, refletido no maior teor de produto.

A recuperação de ganga total cai de 4,9% para 2,7% - uma redução de 45% - enquanto a recuperação de calcopirita cai somente de 84,7% para 81,1% - uma redução de apenas 4,2%.

Esta maior remoção de ganga com o aumento da espuma está ligada ao aumento de drenagem de água em espessuras mais elevadas. Este fato é demonstrado pela relação direta entre a recuperação de água e as recuperações de calcopirita e ganga livre na etapa rougher.

A recuperação de água cai drasticamente com o aumento da camada de espuma, saindo de cerca de 15% para 5%. A queda na recuperação de ganga livre segue uma relação linear com a recuperação de água o que é compatível com o conceito de arraste mecânico (Jowett 1966, Trahar, 1981, Kirjavainen, 1996). A figura 8.3 mostra esta relação.

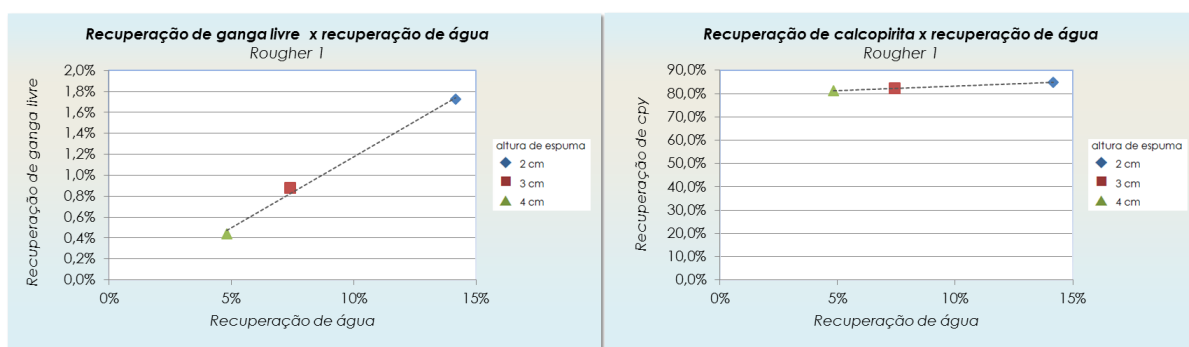


Figura 8.3 - Recuperação de ganga e calcopirita em função da recuperação de água Fonte: Santos, 2014

Estes dados reforçam o alto grau de seletividade que pode ser alcançado na camada espuma bem como a necessidade de considerar as regiões de polpa e espuma separadamente nos estudos de modelamento e simulação.

8.1.1 Modelamento da célula Rougher 1 para o minério global “Bulk”

No mestrado, a representação da etapa rougher utilizando o modelo dos compartimentos forneceu bons resultados. (Santos, 2014) Este modelo havia sido associado aos modelos acessórios mostrados na tabela 8.3 para o arraste mecânico, a recuperação na espuma e a recuperação de água.

Tabela 8.3 – Modelos acessórios avaliados para o minério como um todo

Fenômeno	Modelos Avaliados
Arraste (ENT)	Yianatos and Contreras $ENT = \exp \left(-0,693 \left(\frac{d_i}{\delta} \right)^\varphi \right)$
Recuperação na espuma	Gorain et al. $R_f = \exp (- \beta \cdot \tau_f)$
Recuperação de água na espuma	Gorain et al. $R_{fw} = \exp (- \beta_{fw} \cdot \tau_f)$
Flotação Real na zona de coleta (já inclusa na expressão geral do modelo dos compartimentos).	Cinética de primeira ordem em regime de mistura perfeita $R_{att}^{CZ} = \frac{k_{CZ} \cdot \tau_{CZ}}{1 + k_{CZ} \cdot \tau_{CZ}}$

Para o arraste mecânico, foram determinados os parâmetros apresentados na tabela 8.4 e 8.5. A figura 8.4 apresenta os gráficos comparativos do modelo de Yianatos e os dados medidos.

Tabela 8.4 – Grau de arraste mecânico no rougher 1 para os ensaios Cal 01, Cal 02 e Cal 03

		Grau de arraste medido no rougher 1 (ENT Med)		
Tamanho (um)	Tamanho médio (um)	Teste Cal 01 espuma = 2cm	Teste Cal 02 espuma = 3cm	Teste Cal 03 espuma = 4cm
212,0	250	0,008	0,009	0,007
150,0	178	0,023	0,030	0,013
74,0	105	0,039	0,019	0,055
44,0	57	0,046	0,065	0,058
20,0	30	0,099	0,034	0,099
10,0	4	0,464	0,577	0,300
Arraste Global		0,122	0,118	0,090
Recuperação de ganga livre		1,7%	0,9%	0,4%

Tabela 8.5 – Parâmetros do modelo de Yianatos para o arraste mecânico – minério global

Teste	Cal 01	Cal 02	Cal 03
Altura de espuma (cm)=>	2	3	4
ϕ	0,54	0,90	0,31
δ	3,62	5,74	0,67

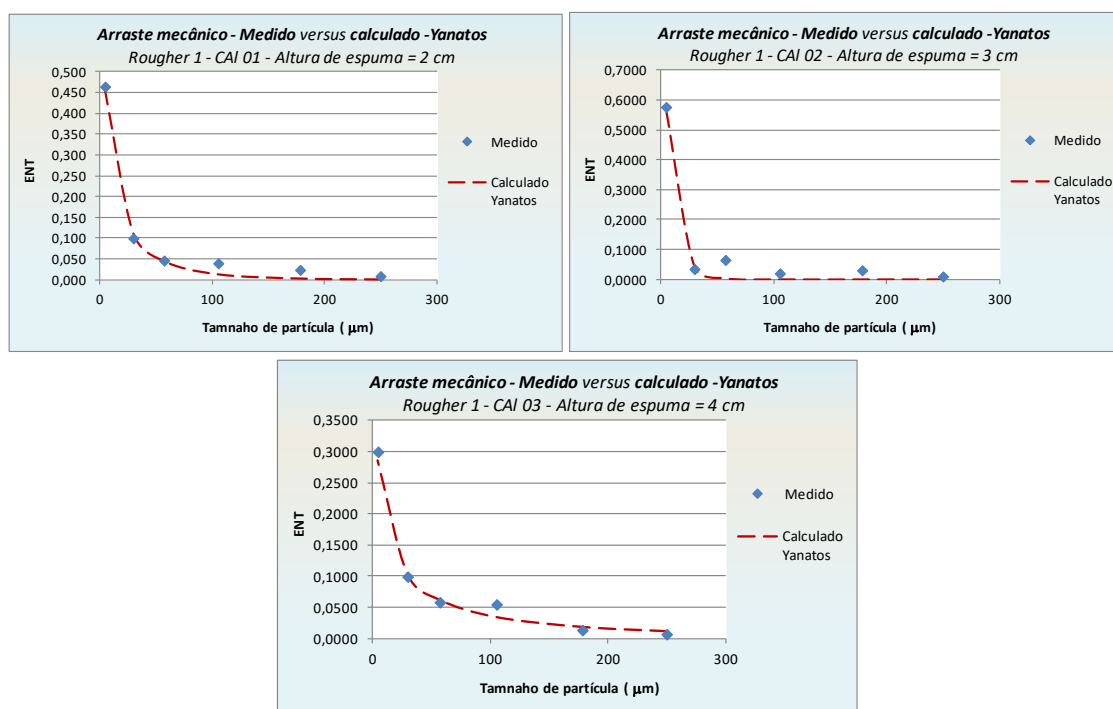


Figura 8.4 – Comparação entre o arraste mecânico medido e curvas do modelo de Yianatos para as três alturas de espuma

Nota-se que o ensaio Cal 2, com espessura de espuma intermediária, apresentou um grau de arraste total igual a 0,118. Este valor está entre o dos outros ensaios (0,122 e 0,09), como seria esperado. O valor de recuperação de ganga também é bem intermediário, igual a 0,9%, entre 1,7 e 0,4%. Entretanto, por fração granulométrica, o valor do grau de arraste para o tamanho de partícula mais fino (<20μm) alcança 0,58, bem superior ao dos demais ensaios. Em contrapartida, o valor da fração 20μm está bem abaixo dos demais ensaios. Possivelmente, neste ensaio e para estas frações, o balanço de massas está um pouco mais deslocado para a ganga do que deveria. Assim, para o ensaio 2, os dados de arraste mecânico por fração granulométrica nas frações 20 e <20μm devem ser vistos com alguma ressalva. De todo modo, os dados globais estão consistentes.

Para a recuperação de água, os parâmetros são apresentados na tabela 8.6.

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 8.6 – Parâmetros do modelo de Gorain para a recuperação de água – minério global, Rougher 1

	Teste	Altura de Espuma	Tempo de Retenção ar na espuma (τ_f)	Recup. Água (Rw)	Recuperação de água na zona de coleta Rwc	Recuperação de água na espuma (Rwf)	Beta	Recuperação de água calculada
Etapa		cm	s	%	%	%		
RG1	Cal 1	2	2,8	14,2%		23,1%		14,1%
	Cal 2	3	4,2	7,4%	41,6%	11,2%	0,516	7,6%
	Cal 3	4	5,2	4,8%		7,1%		4,7%

O modelamento da recuperação na região de espuma também permitiu estimar a recuperação na zona de coleta, igual a 88,3%. A tabela 8.7 apresenta os resultados.

Tabela 8.7 – Parâmetros do modelo de Gorain para a recuperação de água – minério global, Rougher 1 (Santos 2014)

					Gorain	
					$R_f = \exp(-\beta \cdot \tau_f)$	
Altura de Espuma	Tempo de Retenção ar na espuma (τ_f)	Arraste mecânico ENT	Recup. Cpy R		Rf	Rc
cm	s					
2	2,84	0,122	84,7%		72,8%	88,3%
3	4,20	0,118	82,2%		62,6%	88,3%
4	5,19	0,090	81,2%		56,1%	88,3%
Parâmetro					$\beta = 0,112$ $R^2 = 0,976$	

Deste valor de recuperação na polpa foi possível obter a constante k_{CZ} utilizando o tempo de residência na zona de coleta. O volume estimado da zona de coleta foi igual a 600ml e, assim, o tempo de residência foi calculado como 126 segundos ou 2,1 minutos. Deste modo, o valor da constante de flotação k_{CZ} foi calculado como $3,60 \text{ min}^{-1}$. Este conjunto de parâmetros permite a utilização do modelo para calcular as recuperações. A tabela 8.8 consolida os dados calculados e indica a recuperação calculada em comparação com a recuperação medida. Os valores são bem próximos.

Tabela 8.8 - Principais resultados do modelamento do minério global (Santos, 2014)

	Altura de espuma (cm)	Tempo de residência zona de coleta τ_{CZ} (min)	Constante cinética k_{CZ} (1/min)	Rf calculada	ENT calculado	Rw Calculado	Recuperação medida	Recuperação calculada	Teor de calcopirita (%)
Cal 01	2	2,1	3,60	72,8%	0,113	14,1%	84,7%	84,7%	51,1
Cal 02	3	2,1	3,60	62,6%	0,095	7,6%	82,2%	82,6%	58,4
Cal 03	4	2,1	3,60	56,1%	0,079	4,7%	81,2%	80,9%	65,3
$R^2 =$								0,972	

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Uma das conclusões deste trabalho foi que a recuperação na região de espuma mostrou um papel essencial. A recuperação na região de coleta foi igual a 88,3% e as recuperações finais variaram entre 85 e 81%, dependendo, principalmente, da recuperação na espuma que, por sua vez, variou entre 73 e 56% quando a espessura da camada aumentou de 2 até 4 cm.

8.1.2 Questões avaliadas

Com a conclusão da dissertação de mestrado, a questão passou a ser relativa à aplicação destes mesmos modelos por classes de tamanho e liberação. *Em sua forma matemática original, estes modelos seriam válidos para as classes, individualmente?*

O modelo de recuperação de água, no formato expresso, independe da distribuição granulométrica e das classes de liberação, assim, não requer avaliação específica nestes subníveis.

O modelo de arraste mecânico já considerava o comportamento das frações granulométricas. Seria necessário então, prover ajustes específicos deste modelo para as classes de liberação.

O modelo de recuperação na espuma, por sua vez, referia-se somente ao minério global. Então, importava saber se este modelo poderia ser aplicado por classes de tamanho e liberação neste mesmo formato ou se a expressão matemática representaria somente a resultante das frações e/ou classes. De modo similar, a recuperação na zona de coleta precisaria ser determinada para cada classe de tamanho- liberação.

Para determinar se os modelos poderiam ser aplicados por classes, o processo necessitava ser avaliado por fração granulométrica e, em seguida, por classe de liberação. Os próximos itens irão descrever o comportamento do minério por fração granulométrica.

8.2 Avaliação do rougher 1 por fração granulométrica

8.2.1 Resultados rougher 1 por fração granulométrica

A análise dos resultados do rougher por fração granulométrica mostra o comportamento das partículas conforme o tamanho para cada altura de espuma.

De modo semelhante ao minério global, houve uma *redução na recuperação de massas por fração*, como pode ser visto no gráfico da figura 8.5.

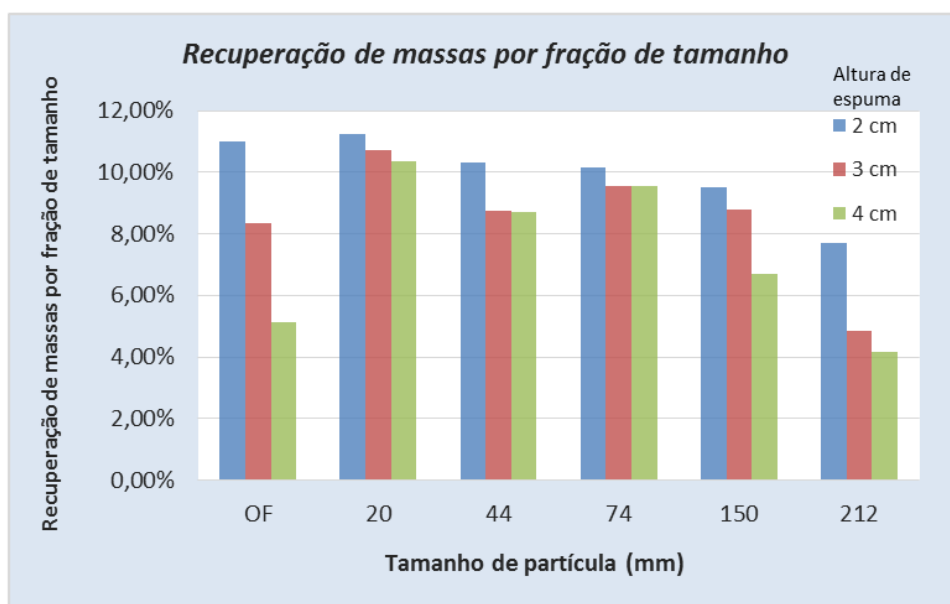


Figura 8.5 - Recuperações de massas no rougher 1 por fração granulométrica e por altura de espuma

Também de modo equivalente ao minério global, para quase todas as frações de tamanho, esta *redução está diretamente associada à maior remoção de ganga (ou ao menor transporte de ganga para o concentrado)*. Este aumento de rejeição de ganga com o aumento da camada de espuma ocorreu em proporções distintas para diferentes tamanhos de partícula, como pode ser visto no gráfico da figura 8.6.

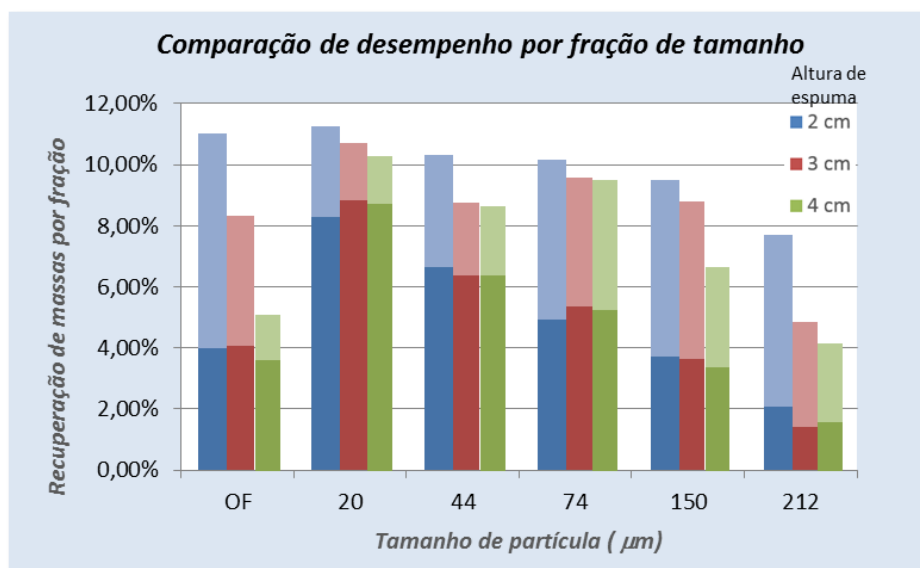


Figura 8.6 - Recuperações de massas e conteúdo de calcopirita no rougher 1 por fração granulométrica. A altura total das barras corresponde à recuperação de massas e a altura da porção em cores mais fortes representa o conteúdo de calcopirita recuperado (teor x recuperação de massa da fração).

Para as frações de ultrafinos ($<20\mu\text{m}$) e de grossos ($150\mu\text{m}$ e $210\mu\text{m}$), a queda na recuperação de massas foi notadamente maior quanto maior a espessura da espuma. Esta queda se deve, largamente, a uma menor proporção de ganga que se reporta ao concentrado. Em outras palavras, o processo de limpeza que ocorre na espuma para estas frações é muito seletivo e até mesmo bastante efetivo, sendo capaz de desprezar muito mais ganga que material hidrofóbico.

As partículas de tamanho médio, entre 20 e $75\mu\text{m}$, apresentam uma recuperação em massa menor para espumas mais espessas, mas a *redução na recuperação de massas é menos pronunciada* quanto maior a espessura da espuma, em comparação com partículas ultrafinas e grossas. Este comportamento pode ser mais bem visualizado no gráfico da figura 8.7.

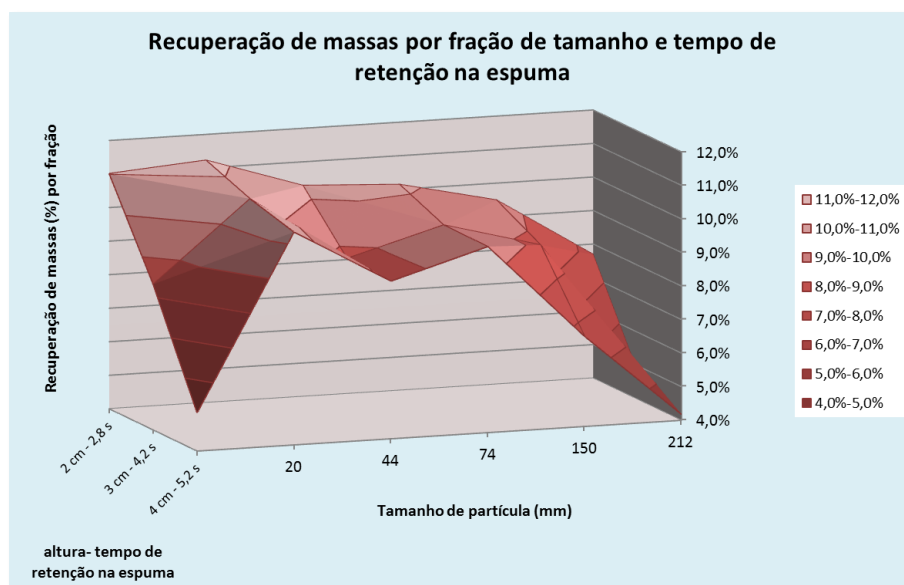


Figura 8.7– Recuperações de massas por fração de tamanho e tempo de retenção na espuma na etapa Rougher 1.

De fato, considerando os extremos de tamanho, partículas maiores se desprendem das bolhas devido a seu maior peso e consequente dificuldade de percorrer um trajeto mais longo na espuma mais espessa. *Este efeito é mais pronunciado para partículas mais hidrofílicas, com maior proporção de ganga*, que tem uma menor força de adesão às bolhas. Por outro lado, partículas muito finas são drenadas juntamente com o líquido por inércia e também retornam para a polpa, reduzindo a recuperação de calcopirita.

O gráfico da figura 8.6 também mostra que *o conteúdo de calcopirita flotado não variou muito com o aumento da altura de espuma*. Deste modo, e em função da maior remoção de ganga, as frações granulométricas do concentrado rougher apresentaram também teores significativamente mais elevados nas espumas mais espessas, de modo semelhante ao verificado para o minério como um todo.

A recuperação de calcopirita por frações granulométricas é ilustrada na figura 8.8.

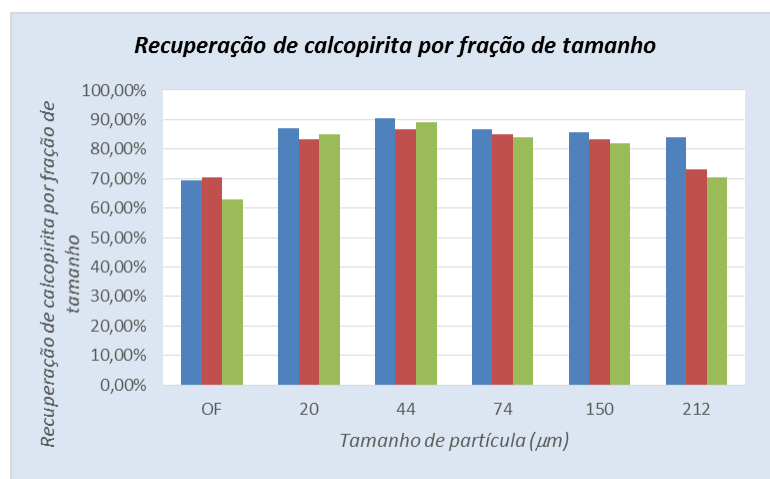


Figura 8.8- Recuperações de calcopirita no rougher 1 por fração granulométrica

Para as frações de tamanho acima de 74μm, a recuperação de calcopirita foi menor para maiores espessuras de espuma.

No outro extremo, para a fração de ultrafinos (<20μm), a recuperação de calcopirita foi similar entre a menor camada de espuma e a intermediária, mas nitidamente inferior na camada mais espessa de espuma.

O mais interessante, porém, é que, para as frações de 20 a 44μm, o comportamento mostrou-se distinto. Nestes pontos, entre a altura de espuma média e elevada, a recuperação de calcopirita, em vez de reduzir, aumentou. Isto sugere que o processo de desprendimento e coleta dentro da espuma deve ser seletivo e mais favorável nestas frações para o desprendimento de ganga e coleta de calcopirita. Em outras palavras, a calcopirita destas frações que se desprende na espuma, voltaria a ser recoletada na própria zona de espuma de forma mais intensa do que nas outras frações, numa recirculação interna maior, que aumentaria mais o teor do concentrado. Isto justificaria o maior enriquecimento e maior recuperação de calcopirita apesar de uma recuperação de massas inferior.

O comportamento da recuperação de calcopirita em função do tamanho de partícula e da altura de espuma é apresentado como superfície 3D na figura 8.9.

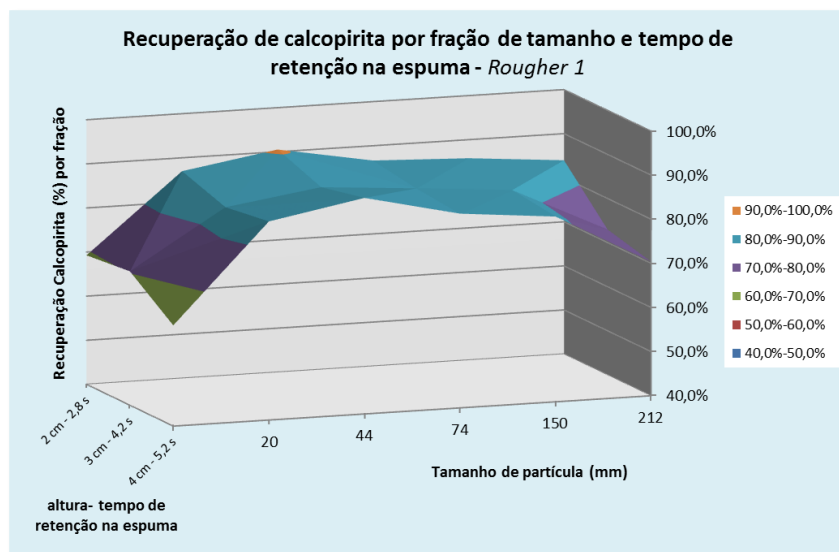


Figura 8.9 - Recuperações de calcopirita por fração de tamanho e tempo de retenção na espuma na etapa Rougher 1

8.2.2 Modelamento rougher 1 por fração granulométrica

Para o minério global, a recuperação na camada de espuma pode ser associada a um modelo de decaimento exponencial de acordo com a altura de espuma ou o tempo de retenção do ar na espuma. Segundo o modelo de Gorain, aplicado de modo bem sucedido ao minério como um todo:

$$R_f = \exp(-\beta \cdot \tau_f) \quad (\text{Eq. 4.36})$$

Para saber se este mesmo modelo poderia ser aplicado a cada fração de tamanho, foram avaliados os perfis de teor e recuperações por altura de espuma para cada tamanho de partícula. Um decaimento exponencial é representado por uma curva continuamente decrescente e apresenta o aspecto variável entre uma curva convexa e uma reta de inclinação negativa. A figura 8.10 apresenta um perfil de curva típico.

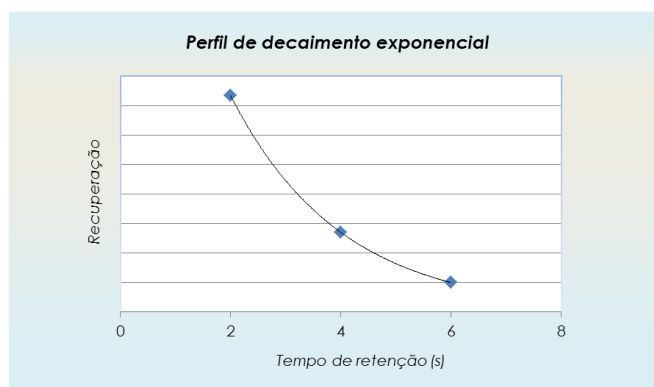


Figura 8.10 - Ilustração do perfil de decaimento exponencial

Se os perfis de variação da recuperação em função da altura de espuma ou do tempo de retenção na espuma de todas as frações granulométricas seguissem o mesmo formato, então o modelo poderia ser aplicado para cada fração individualmente. A figura 8.11 apresenta estes perfis.

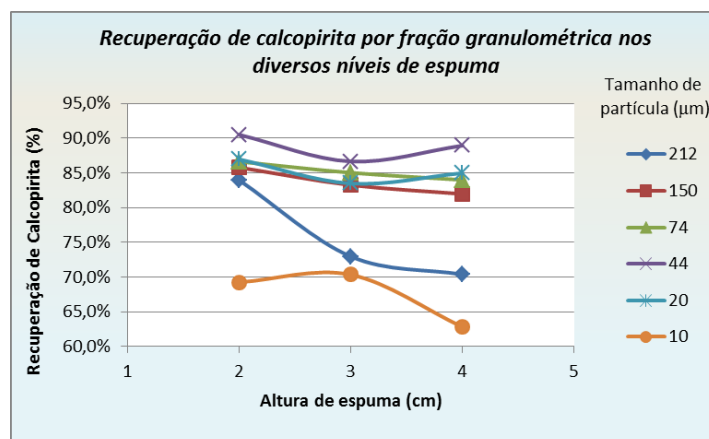


Figura 8.11 - Perfil de recuperação de calcopirita em função da espessura de espuma por fração granulométrica

Por este gráfico, verifica-se que somente as frações de 74, 150 e 210 μm apresentam o formato de decaimento exponencial. Estas frações, juntas, correspondem a algo entre 44 e 48% da massa total de concentrado. As demais frações não seriam bem representadas pelo modelo de Gorain. Assim, os dados indicam que, *embora o decaimento exponencial seja um modelo adequado para o minério como um todo, ele não pode ser aplicado a cada uma das frações granulométricas isoladamente no caso deste estudo.*

Em consequência, *outro modelo deveria ser utilizado para determinar a recuperação da espuma por classes de tamanho e liberação*. Alternativamente, outro modelo poderia ser utilizado para determinar a recuperação global por frações de tamanho ou classes de liberação e, futuramente, a divisão entre polpa e espuma poderia ser feita.

Como as frações de tamanho estão fortemente ligadas às classes de liberação, o modelamento será realizado após a avaliação dos dados de liberação.

8.3 Avaliação da etapa rougher 1 por classe de tamanho liberação

8.3.1 Formatação da análise dos dados e da análise gráfica

Dados relativos a classes tamanho-liberação podem ser apresentados, analisados e avaliados de diversas maneiras.

A primeira forma de apresentação é a que já foi mostrada no item relativo aos balanços, em que o *dado de cada classe de liberação corresponde à proporção em massa daquela classe na fração granulométrica* e, assim, a soma destes dados para as classes de liberação 0 a 11 compõe 100% de cada fração granulométrica. Neste estudo, esta forma é a base para todas as outras. A tabela 8.9 ilustra este tipo de apresentação de dados.

Tabela 8.9– Distribuição % em massa por classe de liberação em cada fração granulométrica

	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											Total	
	0	0,1-15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%		
Tamanho (um)	Distribuição % em massa por classe de liberação em cada tamanho de partícula											(%)	
212	0.7	3.4	18.4	25.2	23.2	16.1	9.1	3.0	0.8	0.1	0.0	100.0	
150	0.8	4.8	9.3	13.8	15.9	16.0	14.5	11.8	8.0	3.7	1.3	100.0	
74	2.4	4.7	8.4	11.2	12.6	12.8	12.2	11.4	10.0	8.3	6.0	100.0	
44	2.9	3.1	somatório é igual a 100% da massa da fração granulométrica								13.0	39.2	100.0
20	4.1	0.6	1.2	1.6	2.1	2.6	3.3	4.5	6.0	9.2	64.9	100.0	
OF	26.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	73.1	100.0	

Isto permite comparar a *distribuição mineralógica em uma fração granulométrica* de um produto com a distribuição mineralógica da mesma fração do produto equivalente em outro ensaio.

A segunda forma é relativa a esta, mas o *dado de cada classe corresponde à proporção em massa daquela classe no produto*. Matematicamente, para obter esta distribuição, basta multiplicar a distribuição anterior, em cada fração granulométrica, pela percentagem retida na respectiva fração. Deste modo, a soma das classes de liberação em uma fração é igual à percentagem retida na fração e a soma de todas as classes de liberação em todas as frações equivale a 100%, como mostra a tabela 8.10.

Tabela 8.10– Distribuição % em massa por classe de liberação e por fração granulométrica

Tamanho (um)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											Total =%retida
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
	Distribuição % em massa por classe de liberação e por tamanho de partícula											
212	0.0	0.3	1.4	1.9	1.8	1.2	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	7.6
150	0.1	0.7	1.3	2.0	2.3	2.3	2.1	1.7	1.1	0.5	0.2	14.2
74	0.6	1.2	2.2	2.9	3.3	3.4	3.2	3.0	2.6	2.2	1.6	26.2
44	0.5	0.5	0.7	somatório é igual a % retida				1.3	1.6	2.2	6.8	17.2
20	1.0	0.2	0.3					1.1	1.5	2.2	15.8	24.4
OF	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	10.4
												100.0

Este formato permite verificar como é a *distribuição mineralógica no produto* e comparar produtos em condições de ensaio distintas, mantendo a mesma base de 100%.

Por se tratarem de distribuição *de massas*, estas duas formas de apresentação incluem a ganga.

Outras duas formas de apresentação equivalentes podem ser utilizadas considerando *somente as partículas que contém calcopirita, bem como a distribuição da calcopirita*, o que permite verificar como o mineral valioso se distribui entre as diversas classes tamanho - liberação.

Assim, na terceira forma, em cada fração granulométrica, a soma das classes de liberação que contém calcopirita (ou seja, excluindo a classe de teor igual a 0) é igual a 100% e este total corresponde à distribuição de calcopirita na fração, como mostra a tabela 8.11. Esta forma permite comparar a distribuição de calcopirita por fração granulométrica em distintas condições.

Tabela 8.11– Distribuição % de calcopirita por classe de liberação em cada fração granulométrica

Tamanho (um)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										Total
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45 - 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
	Distribuição % de calcopirita por classe de liberação em cada tamanho de partícula - somente partículas contendo calcopirita										
212	0.3	9.3	20.6	25.7	22.1	14.7	5.6	1.6	0.2	0.0	100.0
150	0.7	3.7	8.8	13.6	17.0	18.0	16.8	12.7	6.3	2.5	100.0
74	0.6	3.1	6.6	10.0	12.5	14.0	15.0	14.7	13.4	10.3	100.0
44	0.3	1.0								51.6	100.0
20	0.1	0.3								74.7	100.0
OF	0.0	0.0								99.5	100.0

somatório é igual a 100% do conteúdo de calcopirita da fração granulométrica

A quarta forma apresenta, em cada classe, a distribuição percentual de calcopirita em relação do conteúdo de calcopirita no produto. Em cada fração granulométrica, a soma das classes de liberação de 0 a 11 equivale à distribuição de calcopirita no produto e a soma total de todas as classes tamanho liberação é igual a 100%. A tabela 8.12 ilustra este formato.

Tabela 8.12– Distribuição % de calcopirita por classe de liberação e por fração granulométrica no produto. A soma de todas as classes de tamanho e liberação é igual a 100%.

Tamanho (um)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										Total = distrib calcopirita
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45 - 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
	Distribuição % de calcopirita por classe de liberação e por tamanho de partícula - somente partículas contendo calcopirita										
212	0.0	0.4	0.9	1.2	1.0	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	4.5
150	0.1	0.4	1.0	1.5	1.9	2.0	1.9	1.4	0.7	0.3	11.1
74	0.1	0.7	1.5	2.2	2.8	3.1	3.3	3.3	3.0	2.3	22.2
44	0.0	0.2	0.4	0.5	0.8	1.1	1.4	2.0	3.0	10.0	19.4
20	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	1.8	3.0	23.6	31.6
OF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.2	11.3
											100.00

Estes quatro formatos referem-se a um produto em si. Para uma avaliação do processo, as recuperações foram calculadas a partir destes dados e podem também ser expressas por fração granulométrica ou pelo produto como um todo.

Antes, porém, de expressar estas duas formas de recuperação, vale ilustrar como é a relação entre os dados do produto em si e os dados do processo. Embora esta relação seja extremamente usual, a descrição a seguir visa evitar confusão entre as diversas expressões, já que o volume de dados é extenso.

Considere-se, como exemplo, a distribuição por classe de liberação e por fração granulométrica (forma 2) do **fluxo de alimentação do ensaio Cal 03** mostrada na tabela

8.13. Para melhor visualização e interpretação dos dados de liberação, as células estão coloridas numa escala de cor que vai do vermelho para valores mais baixos a verde para valores mais altos.

Tabela 8.13– Distribuição % em massa por classe de liberação e por fração granulométrica para um fluxo de alimentação

	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											Total
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
Tamanho (μ m)	Distribuição % em massa por classe de liberação e por fração granulométrica											
212	11.7	1.5	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0
150	14.4	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	16.3
74	18.2	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	21.0
44	13.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	15.1
20	15.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	1.3	18.0
OF	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.7	15.5
Total	88.0	2.9	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.7	2.7	100.0

Esta tabela permite observar, *neste fluxo individualmente*, como as proporções de cada classe se distribuem. Nota-se que, na alimentação, a ganga correspondeu à maior proporção de massas, equivalente a 88 % do fluxo. Nota-se também que a proporção de partículas grossas e liberadas é muito pequena. Também é muito baixa a proporção de partículas finas ($<20\mu m$) nas classes de teor menor do que 55% de calcopirita. Dito de outro modo, excetuando-se a ganga, a maior parte das partículas que contém calcopirita está “na diagonal” e se distribui predominantemente entre partículas grossas-mistas e partículas finas-liberadas, como é de se esperar pelos mecanismos de quebra e liberação de partículas. A figura 8.12 apresenta esta distribuição na forma gráfica.

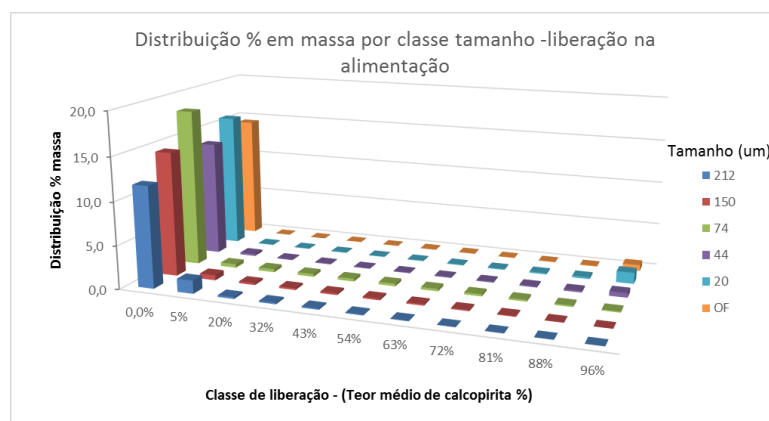


Figura 8.12 - Distribuição % em massa por classe de liberação e por fração granulométrica para um fluxo de alimentação

Na alimentação, a proporção muito elevada de ganga deixa a distribuição de massas com valores muito baixos nas demais classes, o que dificulta um pouco a visualização do impacto desta distribuição no teor de calcopirita. Para resolver esta questão, há duas possibilidades. A primeira refere-se somente à questão de visualização desta distribuição de massas e corresponde a representar graficamente somente a porção que contém calcopirita, ou seja, utilizar esta mesma tabela e incluir no gráfico somente as classes de 2 a 11, o que permite *uma comparação parcial das massas nas classes que contém calcopirita*.

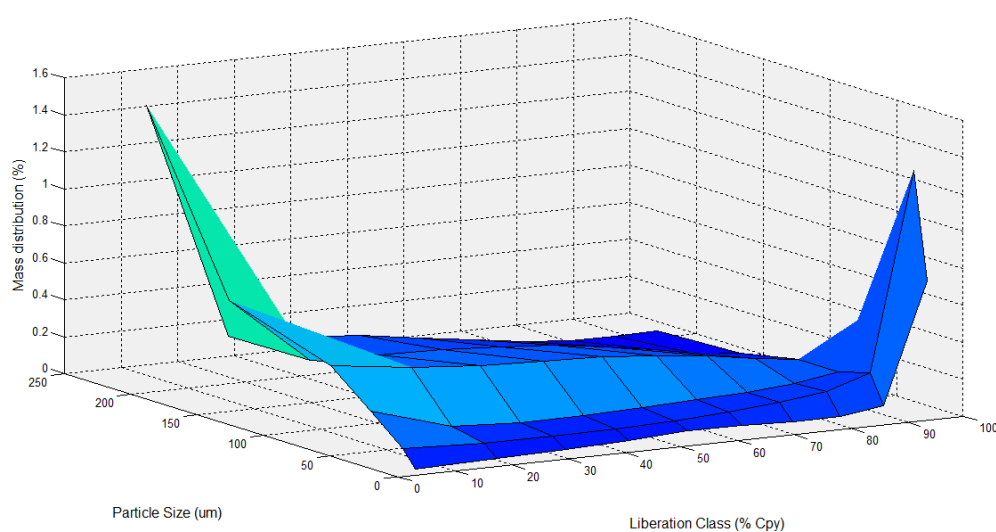


Figura 8.13 - Distribuição % em massa por classe de liberação e por fração granulométrica para um fluxo de alimentação a partir da classe 2.

A segunda forma, mais completa para verificar o efeito desta distribuição de massas no conteúdo de calcopirita, é considerar como este conteúdo de calcopirita se distribui entre as classes, contando *somente as partículas que contém calcopirita e o teor médio de cada classe*, o que equivale a *considerar a distribuição de calcopirita*. A tabela 8.14 e a figura 8.14 apresentam esta distribuição.

Tabela 8.14– Distribuição % de **calcopirita** por classe de liberação e por fração granulométrica para um fluxo de **alimentação do ensaio Cal 03**

Tamanho (um)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											Total
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
212	0%	0.7	0.7	0.9	1.1	0.9	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0	5.2
150	0%	0.7	0.7	1.1	1.5	1.7	1.7	1.6	1.2	0.6	0.2	11.0
74	0%	0.5	1.2	1.7	2.3	2.7	2.9	3.0	2.8	2.5	1.9	21.4
44	0%	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	1.1	1.4	1.8	2.6	8.2	17.7
20	0%	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.4	2.0	3.3	20.6	30.1
OF	0%	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.5	0.5	0.5	0.9	11.3	14.6
Total		2.2	3.2	4.7	6.2	7.2	7.8	8.1	8.5	9.9	42.3	100.0

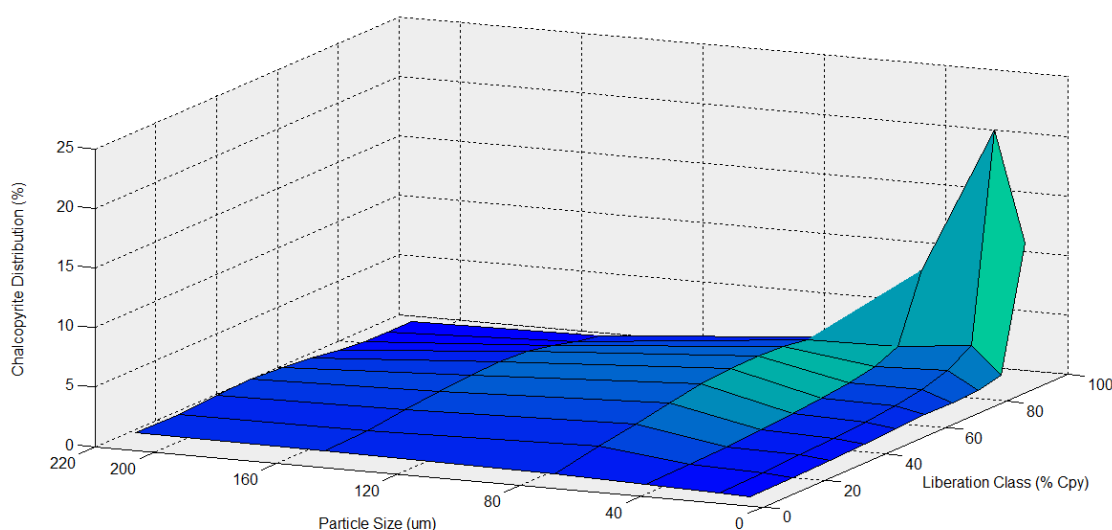


Figura 8.14– Distribuição de calcopirita por classes de liberação, fluxo de alimentação, Cal 03

A tabela 8.14 mostra não somente que a distribuição de calcopirita segue o sentido de partículas grossas-mistas para finas-liberadas, mas que *cerca de metade* da calcopirita existente nesta alimentação está abaixo de 74 μ m e encontra-se liberada ou quase liberada, ou seja, uma porção pequena do espectro tamanho- liberação concentra a maior parte da calcopirita nesta amostra de minério.

A flotação deste fluxo de alimentação gerou um **concentrado rougher1**, com uma recuperação global de massas igual a 7,7%. A composição e distribuição de massas nas classes tamanho-liberação deste produto são apresentadas na tabela 8.15. Novamente, como na alimentação, trata-se de uma distribuição das massas por classes para o produto

na forma 2: o fechamento é igual a 100% para o somatório de todas as classes e, em cada fração, a soma das classes é igual à % retida na classe.

Tabela 8.15– Distribuição % em **massas** por classe de liberação e por fração granulométrica para o fluxo de **concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03**

	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											Total
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
Tamanho (um)	Distribuição % em massa por classe de liberação e por fração granulométrica											
212	0.0	0.3	1.4	1.9	1.8	1.2	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	7.6
150	0.1	0.7	1.3	2.0	2.3	2.3	2.1	1.7	1.1	0.5	0.2	14.2
74	0.6	1.2	2.2	2.9	3.3	3.4	3.2	3.0	2.6	2.2	1.6	26.2
44	0.5	0.5	0.7	0.7	0.8	0.9	1.1	1.3	1.6	2.2	6.7	17.2
20	1.0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.1	1.5	2.2	15.8	24.4
OF	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	10.4
	5.0	2.9	5.9	8.0	8.7	8.4	7.9	7.3	6.9	7.2	31.9	100.0

E a distribuição de calcopirita neste concentrado rougher (forma 4) é apresentada na tabela 8.16.

Tabela 8.16- Distribuição % de **calcopirita** por classe de liberação e por fração granulométrica para um fluxo de **concentrado rougher**

	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											Total
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75-85%	85-93%	93-100%	
Tamanho (um)	Distribuição % de calcopirita por classe de liberação e por fração granulométrica											
212	0	0.0	0.4	0.9	1.2	1.0	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	4.5
150	0	0.1	0.4	1.0	1.5	1.9	2.0	1.9	1.4	0.7	0.3	11.1
74	0	0.1	0.7	1.5	2.2	2.8	3.1	3.3	3.3	3.0	2.3	22.2
44	0	0.0	0.2	0.4	0.5	0.8	1.1	1.4	2.0	3.0	10.0	19.4
20	0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	1.8	3.0	23.6	31.6
10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.2	11.3
												100.0

Nas tabelas 8.15 e 8.16, os dados indicam como a massa ou a calcopirita se distribui dentro das diversas frações e classes do próprio concentrado rougher, que em sua totalidade de classes tamanho e liberação corresponde a 100%. É interessante notar como a distribuição de calcopirita neste concentrado (tabela 8.16) é semelhante à distribuição de calcopirita na alimentação (tabela 8.13). Isto é natural, mesmo porque este concentrado representa uma recuperação de 81% de toda a calcopirita da alimentação.

A recuperação é calculada para cada classe de liberação. Cálculos diretos podem ser feitos a partir dos dados de liberação e do balanço, mas *apenas a título ilustrativo*, considerando as tabelas já apresentadas, a recuperação pode ser calculada em duas etapas. A primeira é a multiplicação dos dados de distribuição de massas do concentrado (tabela 8.15) pela recuperação de massas global deste concentrado rougher (7,7%) que define, para cada classe, a proporção de material flotado em relação *ao total da* alimentação. A tabela 8.17 apresenta estes dados.

Tabela 8.17– Distribuição % em massa de um concentrado rougher por classe de liberação e por fração granulométrica em relação à proporção de massa flotada de alimentação

	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93-100%	Total
Tamanho (um)	Distribuição % em massa por classe de liberação e por fração granulométrica em relação à massa flotada de alimentação											= recup massas
212	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
150	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	1.1
74	0.0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	2.0
44	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	1.3
20	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	1.2	1.9
<20	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8
Recuperação de massas total (%)=												7.7

A recuperação por classe de liberação pode ser obtida pela razão entre esta distribuição e a distribuição de massas da alimentação, apresentada na tabela 8.13. A tabela 8.18 apresenta a recuperação em cada classe para este concentrado rougher do ensaio Cal 03.

Tabela 8.18- Recuperação de massas em cada classe de tamanho-liberação para o fluxo de concentrado Rg 1 ensaio Cal 03

Tamanho (um)	% Retida	Teor (%) Calcopirita	Recup Massa (%) por fração	Recup Cpy (%) por fração	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75-85%	85-93%	93-100%
					Recuperação por classe de liberação										
212	7.6	38.5	4.2%	70.4%	0.0%	1.3%	49.6%	79.9%	88.0%	90.7%	92.0%	92.5%	92.2%		
150	14.2	51.0	6.7%	82.0%	0.1%	8.8%	44.1%	69.9%	83.0%	90.6%	94.9%	96.6%	97.4%	96.4%	95.0%
74	26.2	55.2	9.5%	84.0%	0.3%	22.2%	46.8%	68.4%	79.3%	84.1%	87.5%	90.7%	93.8%	95.6%	95.7%
44	17.2	73.7	8.7%	89.0%	0.3%	16.6%	45.1%	60.1%	69.4%	73.9%	78.1%	82.8%	87.7%	93.6%	98.9%
20	24.4	84.6	10.3%	85.0%	0.5%	16.4%	33.4%	45.1%	54.1%	60.1%	64.8%	69.2%	72.6%	74.5%	93.1%
<20	10.4	70.9	5.1%	62.8%	1.4%	6.0%	3.8%	2.4%	1.1%	0.8%	0.9%	1.2%	1.6%	2.1%	80.3%
65.31															

A recuperação foi mais elevada para partículas liberadas, como era de se esperar, e, dentro de todo o espectro, foi crescente no sentido de partículas finas e não liberadas na direção

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

de partículas grossas e liberadas. É interessante notar que *a recuperação atingiu valores acima de 90 % para partículas mais grossas e liberadas*. A recuperação de partículas mistas apresentou níveis entre 60 e 90%. Mesmo partículas com proporções pequenas de calcopirita, abaixo de 25%, apresentaram níveis razoáveis de flotação, entre 30 e 60% de recuperação. Mais ainda, *para estas partículas nestas classes de liberação baixa, a recuperação foi mais elevada nos tamanhos maiores do que nos menores*.

Esta observação parecia um pouco inconsistente com o conceito de que partículas grossas flutam com menor recuperação do que partículas finas. Uma análise mais detalhada revelou que, ao contrário, os dados eram bastante consistentes. Estes valores de recuperação se referiam a uma única fração granulométrica. Dada a maior proporção de partículas presentes nas classes de menor teor, a recuperação no todo da fração de maior tamanho (+212 μ m) foi igual a 70,4% e foi menor do que as recuperações nas frações de menor tamanho, cujos valores são quase todos superiores a 80%, já que, nestas frações, há maior quantidade de material liberado, de alta recuperação.

Os gráficos da figura 8.15 ilustram como é a relação entre o concentrado e a alimentação em termos de massas por classes, tomando como exemplos as frações de -74 +44 μ m e de -212+150 μ m. A recuperação de cada classe é dada pela razão entre a distribuição de massas do concentrado (em azul claro) e da alimentação (em azul escuro), sendo que a distribuição de massas do concentrado já foi corrigida pela recuperação de massas global. O gráfico da esquerda contém massas de todas as classes na fração, incluindo a ganga. O gráfico da direita contém a mesma base de dados, mas apresenta somente as classes que contém calcopirita, como se fosse uma ampliação do primeiro gráfico nestas classes.

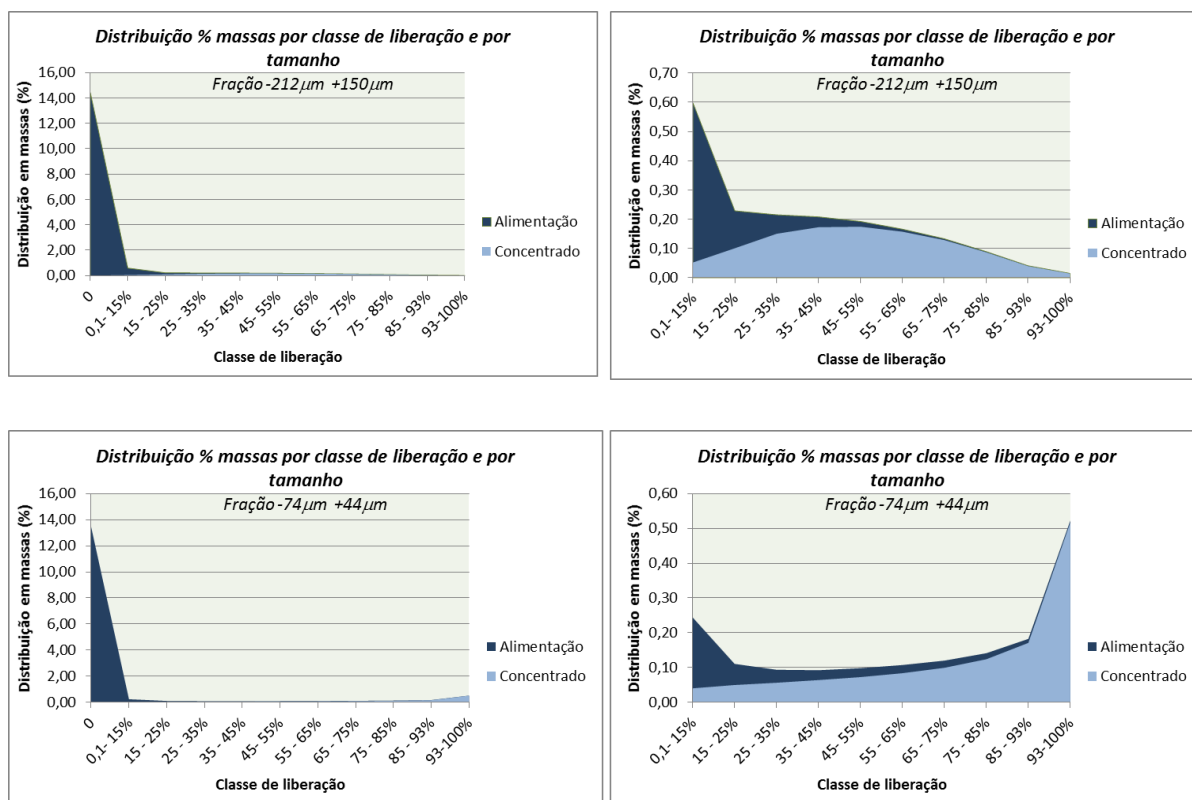


Figura 8.15 – Relação entre a distribuição de massas do concentrado e a da alimentação para as frações -212+150mm e -74+44mm. É notório o aumento da recuperação com o aumento do teor de calcopirita nas classes.

A queda na recuperação de massas é notável para partículas com um baixo conteúdo de calcopirita. Por outro ponto de vista, o aumento da rejeição de ganga também. Estes gráficos permitem ver que a recuperação é sempre elevada nas frações liberadas. Além disto, na alimentação, para o maior tamanho de partícula (212-150µm), a proporção maior de partículas mistas leva a que estas classes também tenham proporção relevante no concentrado. Para partículas mais finas, há predominância de material liberado, o que também leva a que a classe liberada tenha maior proporção no concentrado.

Então, o que ocorre é que existe uma queda na recuperação de partículas mistas, mas esta queda é mais pronunciada nas frações mais finas do que nas frações mais grossas. **Partículas mistas grossas flotaram melhor do que partículas mistas finas.** Partículas liberadas flotaram melhor do que partículas mistas em todos os tamanhos. A resultante é uma recuperação menor para partículas grossas simplesmente por que estas apresentam maior proporção de partículas mistas do que de partículas liberadas.

Estas observações são compatíveis com o conceito de que a recuperação apresenta uma relação direta com a superfície de calcopirita exposta nas partículas. Como era difícil estimar a proporção de calcopirita exposta, a questão seria saber se a recuperação poderia ser matematicamente relacionada com a *proporção de área superficial de calcopirita nas partículas*, independentemente da exposição, apenas como um artifício matemático, como um modelo aproximado. Isto foi inicialmente verificado para cada ensaio em relação ao rougher 1.

8.3.2 Recuperações por classe de liberação – Rougher 1 – Descrição dos dados

Os dados de recuperações por classe para a menor altura de espuma são mostrados na tabela 8.19 e dão uma ideia do comportamento geral.

Tabela 8.19– Recuperações por classe de tamanho e liberação – Rougher 1 – Teste Cal 01 – 2 cm de espuma

Tamanho (μm)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1 - 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45 - 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
	Recuperação por classe de liberação										
212	0.14%	32.7%	81.4%	83.9%	86.6%	93.9%	94.1%	93.7%	93.3%		
150	0.33%	35.5%	82.1%	85.7%	87.0%	89.4%	89.9%	89.4%	89.6%	89.7%	91.8%
74	0.56%	42.0%	73.6%	80.1%	84.1%	87.5%	88.7%	90.2%	90.9%	91.9%	93.1%
44	0.65%	37.5%	66.6%	79.5%	84.3%	85.7%	86.7%	88.6%	90.4%	92.6%	96.7%
20	1.40%	26.6%	45.1%	62.3%	76.3%	82.0%	86.0%	89.3%	91.0%	90.6%	88.1%
10	7.12%	28.4%	29.8%	30.2%	31.8%	33.0%	44.3%	54.1%	63.5%	61.5%	74.5%

Conforme já comentado anteriormente, as recuperações foram maiores no sentido de partículas grossas e liberadas e tenderam a decrescer para partículas finas e não liberadas. Também foram altas as recuperações para partículas mistas em uma faixa ampla. As recuperações caíram muito para partículas com proporção pequena de calcopirita, na classe abaixo de 15%cpy, e foram mínimas para a ganga, uma vez que esta apenas foi arrastada para o concentrado. Para o menor tamanho de partícula, $<20\mu\text{m}$, a recuperação foi baixa para partículas intermediárias e elevada para partículas liberadas.

Para as espumas mais espessas, (ensaios Cal 02 e Cal 03), a tendência foi semelhante, mas acentuaram-se os níveis e mudaram os intervalos em que ocorreu uma queda na recuperação de partículas com menor proporção de calcopirita.

A tabela 8.20 apresenta os resultados para a espessura intermediária.

Tabela 8.20- Recuperações por classe de tamanho e liberação – Rougher 1 – Teste Cal 02 – 3 cm de espuma

Tamanho (um)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75-85%	85-93%	93-100%
	Recuperação por classe de liberação										
212	0.0%	16.7%	63.5%	79.6%	83.6%	84.4%	84.6%	87.2%	92.7%		
150	0.2%	34.3%	69.9%	79.9%	81.5%	87.4%	88.1%	91.7%	93.3%	93.6%	93.7%
74	0.1%	26.3%	62.0%	78.0%	80.7%	82.9%	84.7%	87.3%	91.0%	93.4%	94.2%
44	0.5%	14.0%	47.0%	62.9%	70.8%	77.1%	82.5%	85.5%	88.3%	90.3%	92.7%
20	0.3%	10.9%	35.1%	58.2%	72.2%	78.7%	82.8%	85.1%	85.2%	84.8%	85.0%
OF	4.3%	0.2%	2.3%	6.9%	12.5%	20.0%	34.5%	50.8%	61.3%	75.2%	76.4%

Na espessura intermediária, a recuperação das partículas abaixo de 20 μ m tornou-se ainda menor em todas as classes de liberação. Houve uma significativa queda de recuperação para as partículas com menor proporção de calcopirita, nas classes com menos de 25%cpy.

Entretanto, a recuperação de partículas de tamanho acima de 44 μ m e com maior proporção de calcopirita (acima de 35%cpy) não sofreu alterações tão grandes em relação à espessura de 2 cm. Em geral, quanto maior o conteúdo de calcopirita, menor a diferença nos valores de recuperação entre as espessuras de espuma de 2 e 3 cm.

Na espessura de 4 cm, a recuperação caiu acentuadamente nas classes com menos de 35% cpy, particularmente para os tamanhos menores, como mostra a tabela 8.21.

Tabela 8.21 - Recuperações por classe de tamanho e liberação – Rougher 1 – Teste Cal 03 – 4 cm de espuma

Tamanho (um)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75-85%	85-93%	93-100%
	Recuperação por classe de liberação										
212	0.0%	1.3%	49.6%	79.9%	88.0%	90.7%	92.0%	92.5%	92.2%		
150	0.1%	8.8%	44.1%	69.9%	83.0%	90.6%	94.9%	96.6%	97.4%	96.4%	95.0%
74	0.3%	22.2%	46.8%	68.4%	79.3%	84.1%	87.5%	90.7%	93.8%	95.6%	95.7%
44	0.3%	16.6%	45.1%	60.1%	69.4%	73.9%	78.1%	82.8%	87.7%	93.6%	98.9%
20	0.5%	16.4%	33.4%	45.1%	54.1%	60.1%	64.8%	69.2%	72.6%	74.5%	93.1%
<20	1.4%	6.0%	3.8%	2.4%	1.1%	0.8%	0.9%	1.2%	1.6%	2.1%	80.3%

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A recuperação das partículas abaixo de 20 μm foi muito menor em todas as faixas de liberação, com exceção das partículas totalmente liberadas. Novamente, quanto maior a hidrofobicidade, maior a recuperação para as partículas de tamanho maior. Em relação às espumas menos espessas, a recuperação para tamanhos intermediários e de maior hidrofobicidade não se alterou muito nesta camada de espuma maior. É interessante notar que, *para partículas mais hidrofóbicas*, acima de 76% de calcopirita, *a recuperação em algumas classes foi até superior à observada nas espessuras menores de espuma*. Em contrapartida *houve queda muito expressiva na recuperação de partículas mais finas e de menor teor de calcopirita* para esta altura maior de espuma, resultante da maior drenagem da espuma.

Estes dados sugerem que, para maiores espessuras de espuma, o desprendimento de partículas mistas com muita ganga dá lugar à recoleta de partículas com maior proporção de calcopirita. De fato, segundo a revisão feita por Ata (2012), o desprendimento seletivo de acordo com o tamanho de partícula e sua hidrofobicidade foi reportado em vários estudos. (Falutsu and Dobby, 1992; Honaker et al. ,2006; Yianatos et al. ,1988). Existem também evidências do fenômeno de recoleta de partículas hidrofóbicas. Os resultados obtidos aqui estão de acordo com estas observações.

A questão passou a ser como modelar estes dados, considerando que este fenômeno de recoleta de partículas hidrofóbicas tornava a recuperação na espuma dependente da hidrofobicidade. Os modelos globais não foram aplicáveis aos dados de liberação.

Originalmente, a forma de utilização pensada para o modelo dos compartimentos por classe de liberação requeria que a recuperação na espuma não fosse tão dependente da hidrofobicidade. Uma vez que este não foi o caso, haveria algumas opções:

1. estabelecer um novo modelo matemático para recuperação da espuma de acordo com o grau de hidrofobicidade. Este modelo seria acessório ao modelo dos compartimentos. Para isto, seria necessário estimar a recuperação na zona de coleta para cada classe e determinar a recuperação na espuma em cada classe, utilizando os dados da etapa rougher 1. Isto geraria a distribuição de constantes cinéticas na zona de coleta na etapa rougher 1.

2. estabelecer novos modelos de recuperação global em cada classe de liberação. Em estudos futuros, estes novos modelos poderiam permitir a avaliação da recuperação na espuma por classe.

Um grande esforço foi concentrado na primeira opção, a estimativa de recuperação, por classe de liberação, na zona de coleta, ou seja, na condição hipotética sem espuma. Isto exigia uma estimativa que fosse coerente em todos os parâmetros relativos ao modelo dos compartimentos. Entretanto, este mesmo esforço levou à consideração de novos modelos de recuperação por classe de liberação. Assim, o foco foi alterado para estabelecer novos modelos e o trabalho se desdobrou em duas frentes:

- Uma tentativa de determinar uma equação matemática com poucos parâmetros que pudesse representar a relação entre recuperação e teor mineral das classes de modo direto. Idealmente, os parâmetros desta equação deveriam poder ser correlacionados com fenômenos físicos. Nesta mesma linha, foram avaliadas formas de equações matemáticas para as diferentes expressões de recuperação.
- Uma tentativa de estabelecer, a partir destes dados, outras relações matemáticas que pudessem ser modeladas com equações matemáticas mais simples, utilizando a superfície de calcopirita.

O próximo capítulo descreve o desenvolvimento destes modelos.

Capítulo 9 - Resultados - Parte 4 Novo Modelo para Classes Tamanho Liberação

9.1 Recuperações por classe de liberação – Rougher 1 – Nova equação para modelamento direto

Visando identificar e estabelecer possíveis equações matemáticas que pudessem ser ajustadas aos dados, foram avaliados os perfis de curvas de recuperação versus classe de liberação para todos os tamanhos. A figura 9.1 apresenta estes gráficos. É interessante ver como a maior espessura da camada de espuma realmente reduz a recuperação de partículas mistas e como as partículas mais hidrofóbicas mantêm os patamares mais altos de recuperação. Para partículas acima de 74 μm , na camada de espuma mais espessa (4cm), a recuperação das classes com elevado conteúdo calcopirita chega a ser maior do que a recuperação nas camadas mais finas. Como discutido no capítulo anterior, é possível que haja, nesta maior espessura de espuma, a recirculação de material hidrofóbico. Partículas hidrofóbicas estão sujeitas a desprendimento devido a maior coalescência e ruptura de bolhas numa espuma mais espessa. Por sua própria natureza, muito provavelmente estas partículas são recoletadas antes de retornarem efetivamente à polpa, possivelmente nas proximidades da interface polpa-espuma.

A diferença entre as recuperações nas três alturas de espuma também pode ser visualizada através das superfícies 3D apresentadas nas figuras 9.2 e 9.3. Nestas figuras, é possível

ver de modo mais abrangente como as recuperações das classes mais finas e mais hidrofóbicas é superior para a espessura de espuma mais elevada.

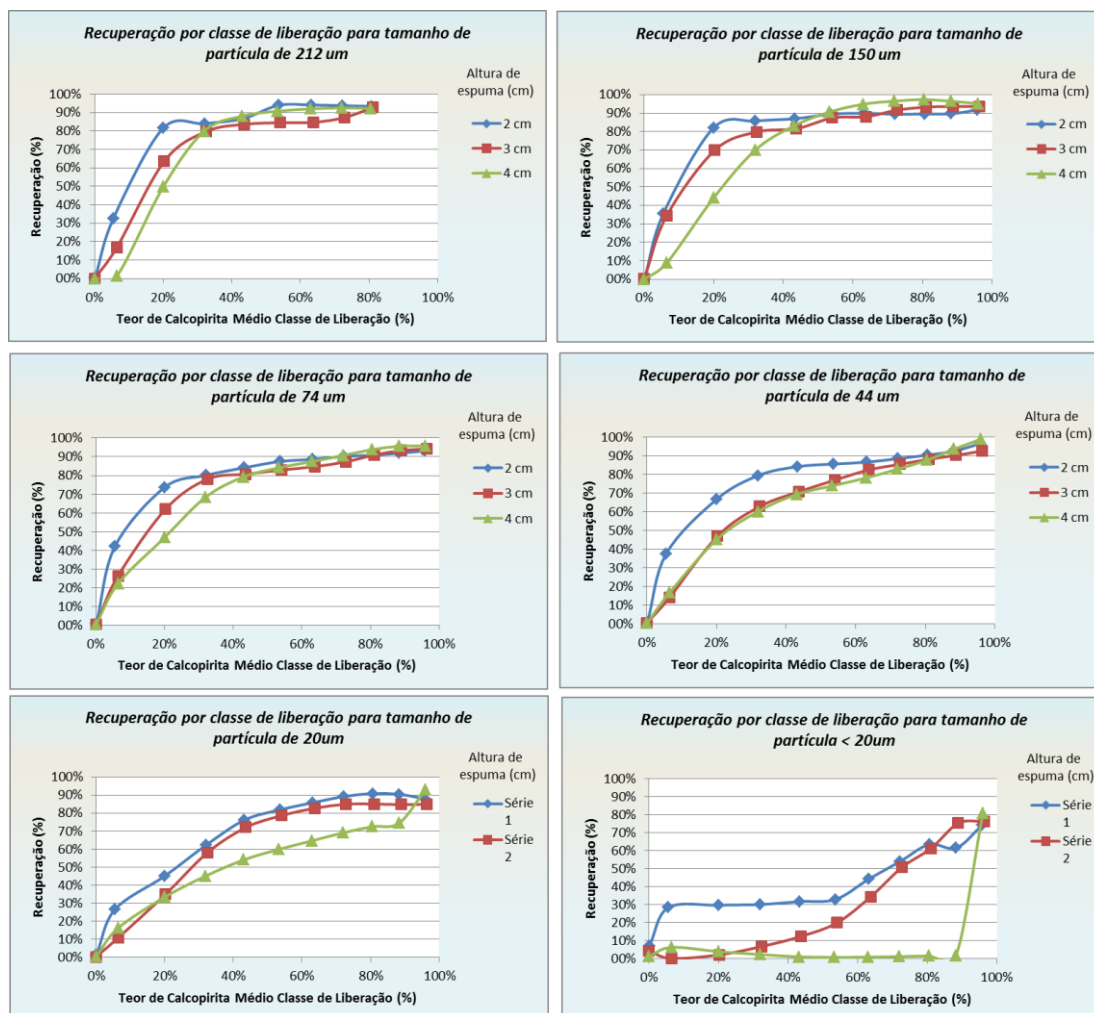


Figura 9.1 – Recuperação de calcopirita no rougher 1 por classe de liberação por faixa de tamanho- Gráficos lineares 2D

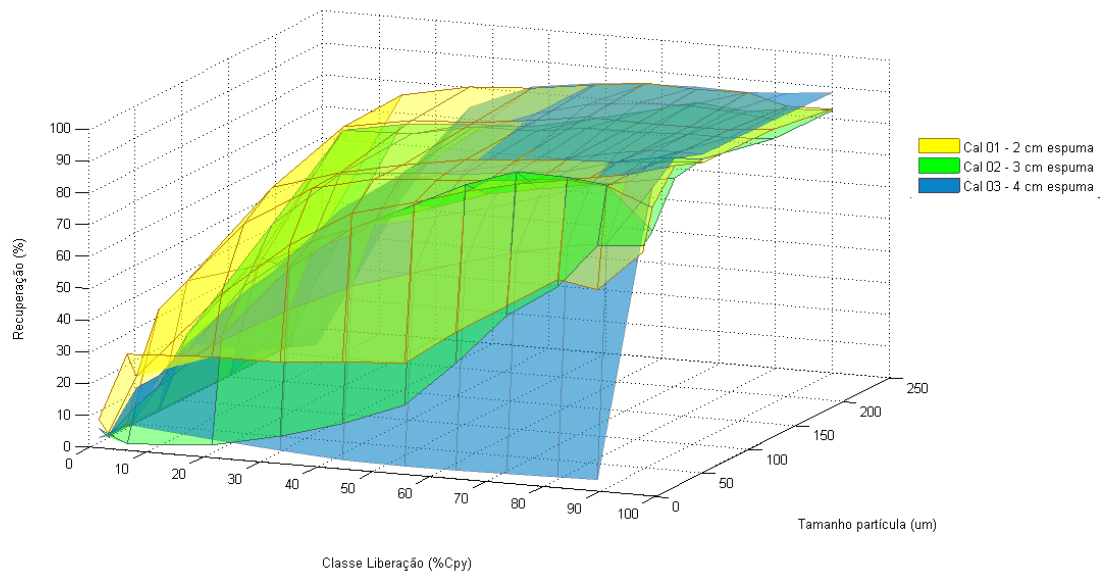


Figura 9.2 – Recuperação de calcopirita em função do tamanho e da liberação para as três alturas de espuma – Gráfico de superfície – Vista 1

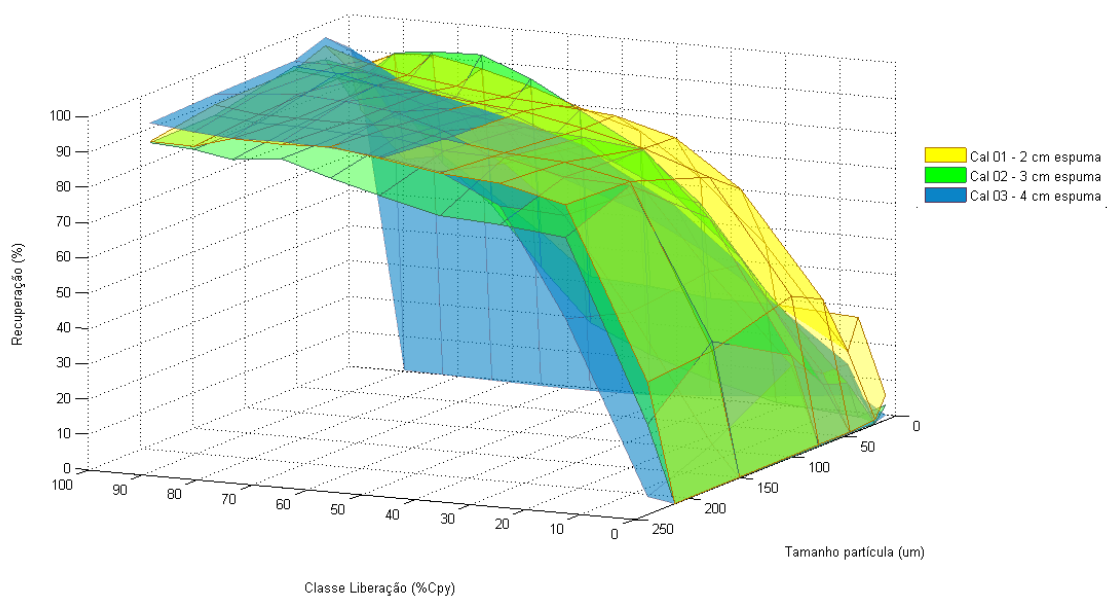


Figura 9.3 – Recuperação de calcopirita em função do tamanho e da liberação para as três alturas de espuma – Gráfico de superfície – Vista 2

Em termos de modelamento, as curvas matemáticas a serem testadas deveriam apresentar grande flexibilidade de formatos em função dos parâmetros para poderem ser ajustadas aos dados. Várias possíveis curvas foram escolhidas/criadas e testadas.

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Entre diversas fórmulas testadas, a que proveu melhores resultados foi a equação 9.1 que correlaciona a recuperação ao teor médio das classes g utilizando três parâmetros, Γ , Δ e Ψ :

$$Rec_j = \Gamma \cdot e^{-\Psi \cdot \bar{g}_j} \cdot [1 - e^{-\Delta \cdot \bar{g}_j}] \quad (Eq. 9.1)$$

Esta equação, com apenas três parâmetros, proveu um ótimo ajuste para as recuperações nas diversas frações de tamanho dos três ensaios como mostram os gráficos das figuras 9.4 a 9.6.

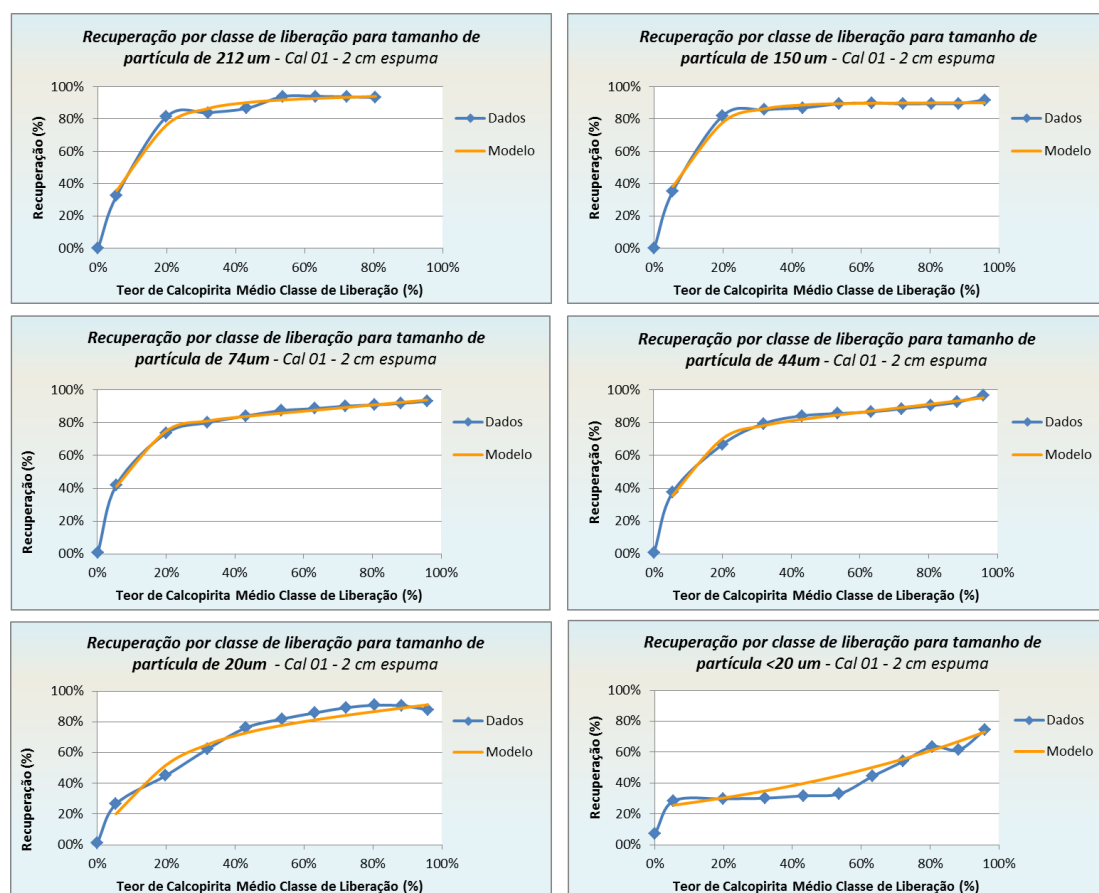


Figura 9.4 – Dados de recuperação medidos e dados ajustados com a equação de modelamento proposta (9.1) para cada fração granulométrica – Teste Cal 01 – 2 cm de espuma

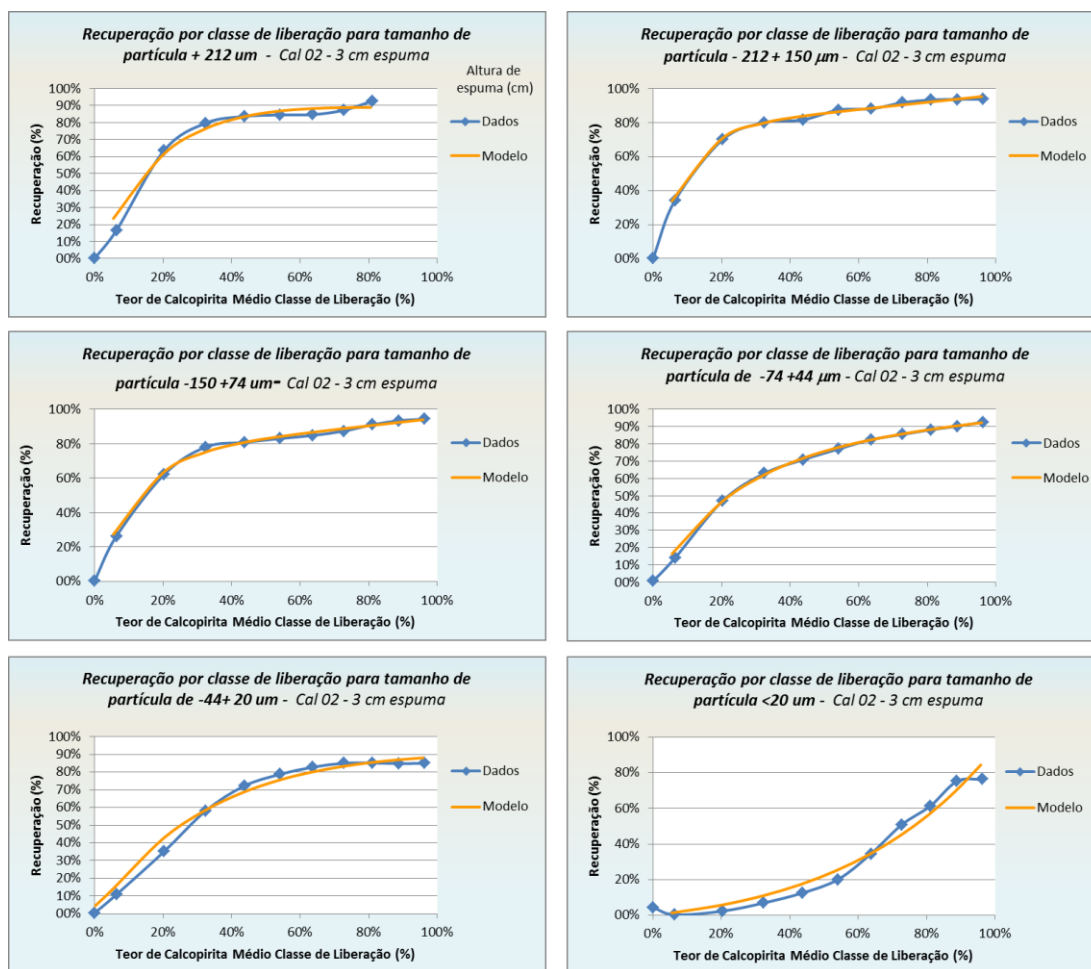


Figura 9.5 – Dados de recuperação medidos e dados ajustados com a equação de modelamento proposta (8.1) para cada fração granulométrica – Teste Cal 02 – 3 cm de espuma

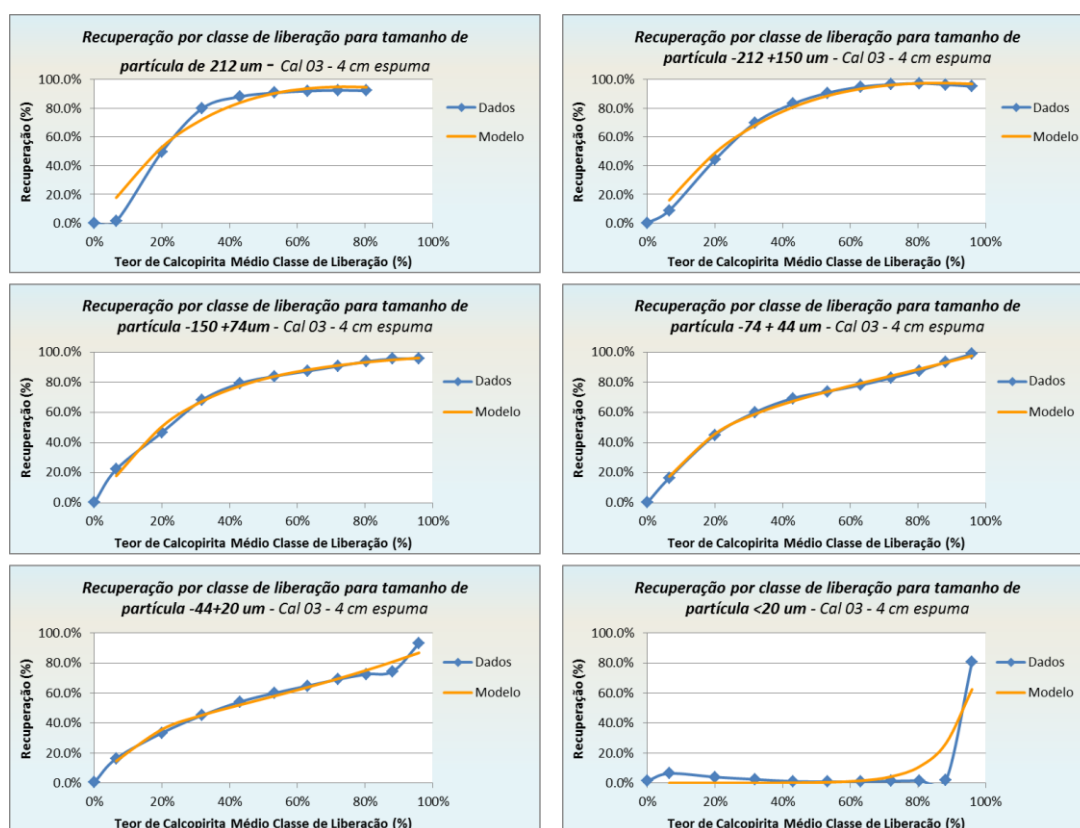


Figura 9.6 – Dados de recuperação medidos e dados ajustados com a equação de modelamento proposta (9.1) para cada fração granulométrica – Teste Cal 03 – 4 cm de espuma

Tabela 9.1 – Parâmetros do modelo de recuperação por classe de liberação para cada fração de tamanho – Teste Cal 01 – 2 cm de espuma

Tamanho (um)	Parâmetros			Correlação
	Γ	Δ	Ψ	R^2
212	0.89	9.28	-0.06	98.1%
150	0.90	10.18	-0.01	98.9%
74	0.77	13.73	-0.21	99.6%
44	0.73	11.84	-0.27	99.0%
20	0.69	6.19	-0.30	96.1%
10	0.24	311.00	-1.16	92.1%

Tabela 9.2 – Parâmetros do modelo de recuperação por classe de liberação para cada fração de tamanho – Teste Cal 02 – 3 cm de espuma

Tamanho (um)	Parâmetros			Correlação
	Γ	Δ	Ψ	R^2
212	0.98	5.02	0.10	98.2%
150	0.77	10.48	-0.23	99.6%
74	0.75	8.08	-0.23	99.5%
44	0.79	4.17	-0.18	99.9%
20	1.00	2.80	0.06	98.5%
10	0.58	0.36	-1.67	97.3%

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 9.3 – Parâmetros do modelo de recuperação por classe de liberação para cada fração de tamanho – Teste Cal 03 – 4 cm de espuma

Tamanho (μm)	Parâmetros			Correlação
	Γ	Δ	Ψ	R^2
212	9.85	0.35	1.17	97.4%
150	9.55	0.32	1.01	99.5%
74	0.93	3.90	-0.07	99.4%
44	0.55	6.70	-0.59	99.8%
20	0.36	9.09	-0.93	97.6%
10	0.00	5.54	-11.34	81.2%

Uma vez que esta equação forneceu uma representação adequada da recuperação por classe de liberação em cada fração de tamanho, para completar o modelo, restava verificar se os parâmetros Γ , Δ , Ψ poderiam ser associados a fenômenos ou características físicas.

Entretanto, não foram identificadas equações simples que os relacionassem a condições físicas. Assim, *a equação 9.1 foi válida matematicamente para representar a forma como a recuperação varia em relação ao tamanho de partícula*, porém, seria necessário investigar mais a fundo se estes parâmetros poderiam ser correlacionados a características ou condições de processo para consolidar a equação 9.1 de modo completamente efetivo. Como o objetivo deste trabalho era estabelecer equações mais diretas ou simples, foi priorizada a avaliação de novas equações ou relações. De todo modo, *a equação 9.1 é matematicamente válida e merece avaliações futuras em sua estrutura matemática original ou em formas semelhantes*.

9.2 Relação entre a recuperação e a distribuição de área superficial de calcopirita

O espectro de recuperações em relação às classes de tamanho-liberação mostrado nas tabelas 8.20 a 8.22 e nos gráficos das figuras 9.2 e 9.3 indicava valores nitidamente mais altos quanto maior a hidrofobicidade, como seria de se esperar. Entretanto, chamava a atenção o fato de que, comparando partículas maiores com partículas menores, *a recuperação nas classes de liberação mistas fosse maior para partículas maiores*. A tabela 9.2 reapresenta os dados de recuperações por classe de liberação por fração

granulométrica para o ensaio Cal 03, destacando estes resultados para partículas mistas nos tamanhos maiores e menores que 74 μm .

Tabela 9.4 - Recuperações por classe de tamanho e liberação – Rougher 1 – Teste Cal 03 – 4 cm de espuma

Tamanho (μm)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1-15%	15-25%	25-35%	35-45%	45-55%	55-65%	65-75%	75-85%	85-93%	93-100%
Recuperação por classe de liberação											
212	0.0%	1.3%	49.6%	79.9%	88.0%	90.7%	92.0%	92.5%	92.2%		
150	0.1%	8.8%	44.1%	69.9%	83.0%	90.6%	94.9%	96.6%	97.4%	96.4%	95.0%
74	0.3%	22.2%	46.8%	68.4%	79.3%	84.1%	87.5%	90.7%	93.8%	95.6%	95.7%
44	0.3%	16.6%	45.1%	60.1%	69.4%	73.9%	78.1%	82.8%	87.7%	93.6%	98.9%
20	0.5%	16.4%	33.4%	45.1%	54.1%	60.1%	64.8%	69.2%	72.6%	74.5%	93.1%
<20	1.4%	6.0%	3.8%	2.4%	1.1%	0.8%	0.9%	1.2%	1.6%	2.1%	80.3%

Parecia razoável supor que esta maior recuperação das partículas grossas e mistas talvez estivesse ligada à própria presença, na alimentação, de uma proporção maior de calcopirita nas partículas grossas e não liberadas. Entretanto, como já mostrado na tabela 8.13 (reapresentada a seguir) o perfil de distribuições de calcopirita nas classes de liberação da alimentação foi distinto do perfil de recuperações do concentrado. Na alimentação, a distribuição de calcopirita seguia “na diagonal”, no sentido de partículas grossas e mistas para partículas finas e liberadas, como apontam as células alaranjadas, e a maior parte da calcopirita estava nas partículas liberadas ou quase liberadas abaixo de 44 μm .

Tabela 8.13- Distribuição % de **calcopirita** por classe de liberação e por fração granulométrica para um fluxo de **alimentação**

Tamanho (μm)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											Total
	0	0,1-15%	15-25%	25-35%	35-45%	45-55%	55-65%	65-75%	75-85%	85-93%	93-100%	
Distribuição % de calcopirita por classe de liberação e por fração granulométrica												
212	0%	0.7	0.7	0.9	1.1	0.9	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0	5.2
150	0%	0.7	0.7	1.1	1.5	1.7	1.7	1.6	1.2	0.6	0.2	11.0
74	0%	0.5	1.2	1.7	2.3	2.7	2.9	3.0	2.8	2.5	1.9	21.4
44	0%	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	1.1	1.4	1.8	2.6	8.2	17.7
20	0%	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.4	2.0	3.3	20.6	30.1
OF	0%	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.5	0.5	0.5	0.9	11.3	14.6
Total		2.2	3.2	4.7	6.2	7.2	7.8	8.1	8.5	9.9	42.3	100.0

Sobrepondo este perfil da alimentação ao perfil de recuperação de calcopirita no concentrado rougher, observava-se que partículas muito hidrofóbicas reportariam ao concentrado com recuperações elevadas, independentemente da proporção em massas em que estivessem presentes na alimentação. O que parecia intrigante era que partículas

mistas de tamanho maior do que 212 μ m com apenas 25-35% de calcopirita fossem capazes de reportar ao flotado com uma recuperação quase duas vezes maior que partículas de 20 μ m com a mesma proporção de calcopirita.

Este comportamento só faria sentido considerando que uma partícula de 212 μ m com 25-35% de calcopirita, de fato, apresenta uma superfície muito maior de calcopirita disponível para adesão ao ar do que uma partícula de 20 μ m. Deste modo, *a recuperação de calcopirita por classes deveria ter alguma relação com a proporção de superfície de calcopirita disponível, no fluxo de alimentação, para adesão nas bolhas de ar.*

Quando esta hipótese foi levantada, já não seria possível determinar, por análise mineralógica, a quantidade de calcopirita efetivamente disponível na superfície externa das partículas. Ainda assim, como esta hipótese fazia muito sentido, foi avaliada a quantidade de superfície total de calcopirita em cada classe de liberação e sua relação com a recuperação. Mesmo que parte do conteúdo de calcopirita estivesse incluso, a proporção de calcopirita total existente nas partículas da alimentação, após ser convertida em área superficial de calcopirita, poderia indicar alguma correlação com a recuperação.

Como exemplo de cálculo, seja considerada a distribuição em massas do fluxo de alimentação do ensaio Cal 03, apresentada na tabela 9.5.

Tabela 9.5– Distribuição % em massa por classe de liberação e por fração granulométrica para um fluxo de alimentação

			Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											Total
			0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
Tamanho (µm)	%Retida	Teor Cpy (%)	Distribuição % em massa por classe de liberação em cada fração granulométrica											
212	14.0	2.3	83.8	10.9	1.6	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0
150	16.3	4.2	88.4	3.7	1.4	1.3	1.3	1.2	1.0	0.8	0.5	0.3	0.1	100.0
74	21.0	6.3	86.8	2.0	1.7	1.6	1.5	1.5	1.3	1.2	1.0	0.8	0.6	100.0
44	15.1	7.2	88.7	1.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	1.2	3.4	100.0
20	18.0	10.3	87.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.9	1.3	7.2	100.0
<20	15.5	5.8	93.3	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	4.7	100.0
Total	100.0	6.2												

A tabela 9.6 apresenta as densidades de cada classe de liberação.

Tabela 9.6 – Densidades de cada classe de liberação

Classe j=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Teor classe (%)	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Densidade (g/cm ³)	3.12	3.18	3.30	3.41	3.53	3.65	3.77	3.89	4.01	4.13	4.27

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Para a conversão dos valores de massas para volumes, os valores de cada classe tamanho-liberação da tabela 8.12 foram divididos pela densidade de suas respectivas classes, como indicado na equação 9.2, obtendo uma série de valores em volumes por classe de liberação.

$$vol_{ij} = \frac{f_{m\ i,j}}{\rho_j} \quad (Eq. 9.2)$$

Para converter estes valores em superfícies de partícula, é necessário multiplica-los pela razão entre a *superfície* de cada tamanho de partícula dividida pelo *volume* estimado de cada tamanho de partícula, sendo as partículas consideradas como esferas. Assim, sendo d_i o tamanho de cada partícula, esta razão é indicada pela equação 9.3:

$$\frac{\text{superfície da partícula}}{\text{volume partícula}} = \frac{\pi d_i^2}{\pi d_i^3 / 6} = \frac{6}{d_i} \quad (Eq. 9.3)$$

A área superficial das partículas de cada classe j pode ser estimada a partir da equação 9.4, onde ρ_j é a densidade de cada classe e $ms_{i\ alim}^{***}$ é a percentagem retida no tamanho correspondente à classe:

$$sup_{ij} = \frac{f_{m\ j\ alim}^{***} \cdot ms_{i\ alim}^{***}}{\rho_j} \cdot \frac{6}{d_i} \cdot M_{alim\ gl}^{***} \quad (Eq. 9.4)$$

E a área superficial de mineral valioso **mrl** na classe j pode ser obtida pela multiplicação desta equação pelo teor médio da classe.

$$sup_{mrl\ i,j} = \frac{f_{m\ j\ alim}^{***} \cdot ms_{i\ alim}^{***}}{\rho_j} \cdot \frac{6}{d_i} \cdot \bar{g}_{mj}^{***} \cdot M_{alim\ gl}^{***} \quad (Eq. 9.5)$$

A figura 9.7 apresenta estes resultados.

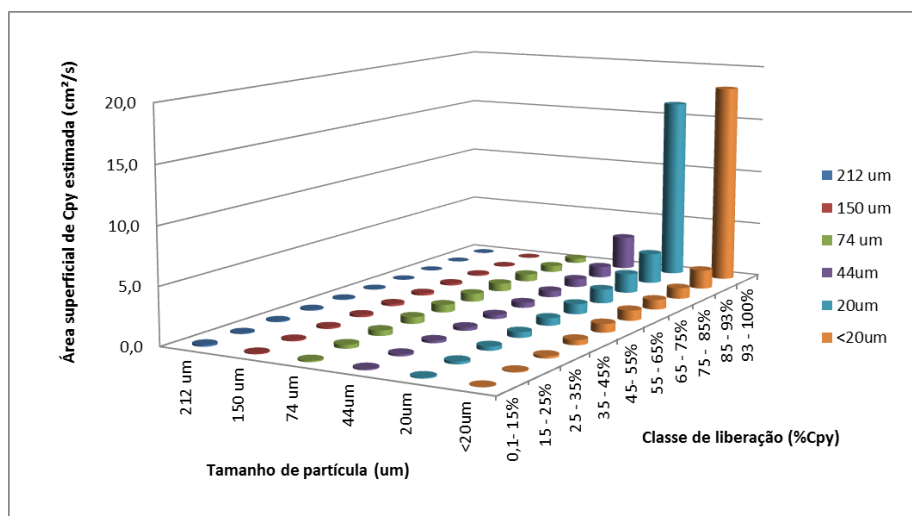


Figura 9.7 - Área Superficial estimada de calcopirita (cm²/s) da alimentação

A questão era se esta área superficial nas classes de liberação da alimentação poderia ser correlacionada com a recuperação na flotação do concentrado rougher.

Como a intenção é verificar o comportamento de cada ensaio e comparar os ensaios em todas as dimensões por classe de liberação, é necessário calcular, para a etapa rougher, como é a distribuição da recuperação global de calcopirita pelas classes. Matematicamente, isto é representado pela equação 9.6.

$$Rec\ Cpy_{i,j} = \frac{f_{m\ i,j\ Rg} \cdot g_{j\ Rg} \cdot m_{Si\ Rg} \cdot M_{gl\ Rg}}{g_{m\ gl\ alim} \cdot M_{gl\ alim}} \quad (Eq. 9.6)$$

O somatório destes valores de todas as classes será igual à recuperação global na etapa. A tabela 9.7 apresenta estes resultados para o ensaio Cal 03, em que a recuperação global foi igual a 81,2%.

Tabela 9.7 – Distribuição de recuperação de calcopirita no concentrado rougher 1 do ensaio Cal 03 em relação à alimentação global

			Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
			0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93-100%	
Tamanho (um)	% Retida	Teor Cpy(%)	Distribuição % da recuperação de calcopirita por classe de liberação e por fração granulométrica em relação à alimentação											Total
212	7,6	38,5	0,0%	0,0	0,3	0,8	0,9	0,8	0,5	0,2	0,1	0,0	0,0	3,6%
150	14,2	51,0	0,0%	0,1	0,3	0,8	1,2	1,5	1,6	1,5	1,1	0,6	0,2	9,0%
74	26,2	55,2	0,0%	0,1	0,6	1,2	1,8	2,3	2,5	2,7	2,6	2,4	1,9	18,0%
44	17,2	73,7	0,0%	0,0	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9	1,2	1,6	2,4	8,1	15,8%
20	24,4	84,6	0,0%	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0	1,5	2,5	19,1	25,6%
10	10,4	70,9	0,0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,1	9,1%
		65,3	0,0%	0,2%	1,5%	3,2%	4,7%	5,6%	6,2%	6,6%	6,9%	7,9%	38,5%	81,2%

Estes valores de recuperação foram divididos pela área superficial. Os resultados são mostrados na tabela 9.8.

Tabela 9.8 – Razão entre a recuperação de calcopirita por classe de liberação no concentrado rougher 1 e a distribuição de área superficial de calcopirita por classe de liberação na alimentação

Tamanho (µm)	% Retida	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
		0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
		Razão entre recuperação de calcopirita por classe de liberação e área superficial de calcopirita na alimentação										
212	7,6	0	0,07	4,9	8,2	9,4	10,0	10,5	10,9	11,2	11,6	12,2
150	14,2	0	0,76	3,2	5,2	6,4	7,2	7,8	8,2	8,5	8,7	8,8
74	26,2	0	0,92	1,7	2,5	3,0	3,3	3,6	3,8	4,0	4,2	4,3
44	17,2	0	0,37	0,92	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,5	2,7
20	24,4	0	0,20	0,32	0,45	0,55	0,63	0,71	0,78	0,85	0,90	1,2
10	10,4	0	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,50

Foi surpreendente encontrar que estes valores, em cada faixa de liberação, eram diretamente proporcionais ao tamanho de partícula. Mais do que isto, esta relação permanecia linear mesmo para um baixo conteúdo de calcopirita, até a classe 15-25%. As figuras 9.8 e 9.9 ilustram este comportamento.

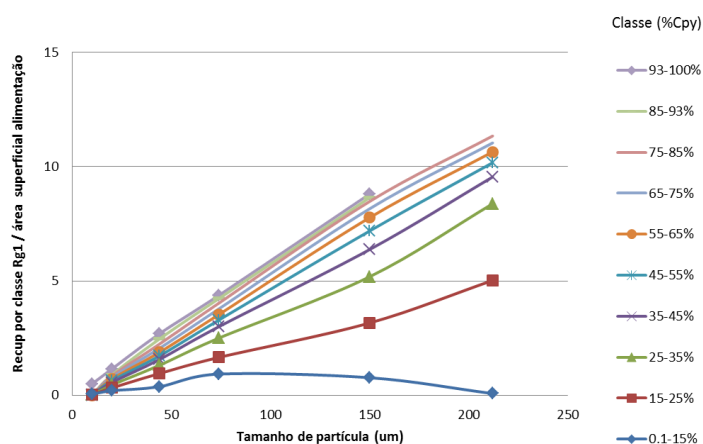


Figura 9.8 – Razão entre recuperação de calcopirita por classe de liberação e área superficial versus 7 do tamanho de partícula - Teste Cal 03 – 4 cm de espuma

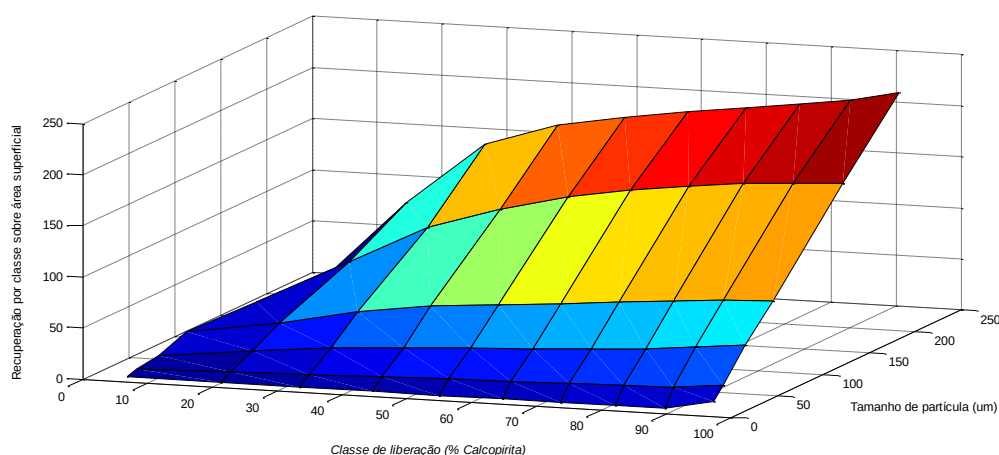


Figura 9.9 – Fator em função da classe de liberação e tamanho de partícula

Considerando cada classe, ou cada reta, este comportamento poderia ser interpretado a partir de dois pontos de vista. Pensando em comparar uma partícula grossa com uma partícula fina, ambas com o mesmo conteúdo mineral, a recuperação foi maior para partícula maior por que esta apresenta uma área mineral maior disponível para adesão. Mas para avaliar o processo, é conveniente pensar na quantidade existente em cada classe, e neste caso, estamos pensando nesta quantidade expressa em área de superfície de

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

mineral, o que engloba a massa, o diâmetro e a densidade. Para uma mesma quantidade de área superficial numa classe, o número de partículas grossas é menor que o número de partículas finas. A figura 9.10 ilustra esta relação para uma mesma área superficial.

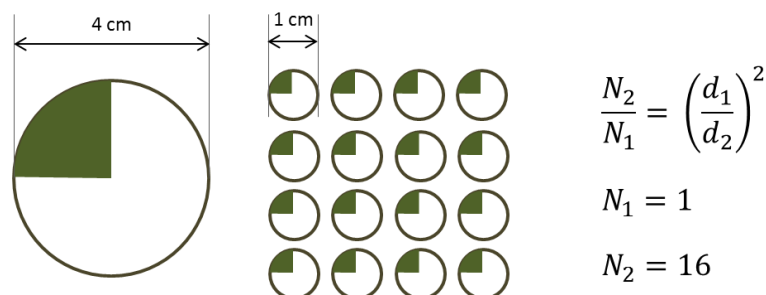


Figura 9.10 – Para apresentar uma mesma área superficial mineral, o número de partículas finas é bem maior que o de partículas grossas

Então, há também uma questão de probabilidade de colisão e adesão. Para um mesmo tempo de residência numa célula e um mesmo conteúdo mineral exposto, uma partícula maior terá maior probabilidade de ser coletada – ou seja, de colidir e aderir - do que um conjunto completo de partículas menores.

Somente para a classe com menor teor de calcopirita, 0,1-15%, é que este efeito e a linearidade se perdem. Muito provavelmente, nesta classe, a pequena proporção de mineral hidrofóbico não é suficiente para manter as partículas maiores e mais pesadas na espuma. Ocorre então um desprendimento maior de partículas maiores. Como consequência, a razão recuperação/ superfície mineral passa a ter uma relação com o tamanho de partícula que pode ser aproximada por uma parábola.

Comparando classes distintas, a inclinação destas retas é menor para classes de menor teor. Isto reflete a recuperação menor para classes menos hidrofóbicas, com menor teor calcopirita, como seria de se esperar.

Matematicamente, então, esta razão de recuperação e superfície pode ser descrita como uma função linear do tamanho para cada classe i, j , como indica a equação 9.7:

$$\frac{Rec\ Cpy_{i,j}}{sup_{mrl\ i,j}} = \hat{a}d_i + \hat{b} \quad (Eq. 9. 7)$$

Então, a partir de uma combinação das equações 9.7 e 9.5 , chega-se a:

$$Rec\ Cpy_{i,j} = \frac{f_{mj\ alim.}^{***} \cdot ms_{i\ alim.}^{***} \cdot \bar{g}_{mj}^{***}}{\rho_j} \cdot 6 \cdot \left(\hat{a} + \frac{\hat{b}}{d_i} \right) \quad (Eq. 9. 8)$$

Onde $\hat{a}$ e $\hat{b}$ são os coeficientes da reta da eq 9.7 e que estão relacionados à combinação de efeitos da hidrofobicidade e da distribuição e tamanho de partículas sobre a efetividade da flotação.

Este resultado abre um novo espaço para a avaliação da flotação por classe de tamanho e liberação, ao confirmar de modo matemático simples e coerente o conceito de que a flotação está diretamente ligada à superfície hidrofóbica na partícula.

A tabela 9.9 apresenta os resultados destes coeficientes para o ensaio Cal 03, obtido por ajuste de mínimos quadrados e considerando o valor de tamanho de partícula em milímetros apenas para este ajuste.

Tabela 9.9 – Coeficientes das retas de recuperação sobre superfície de calcopirita versus tamanho de partícula – Rougher 1 – Teste Cal 03

Classe de liberação	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Coeficiente a			23.9	40.3	46.7	50.3	53.0	54.9	56.2	60.7	59.0
Coeficiente b			-0.18	-0.45	-0.46	-0.44	-0.41	-0.36	-0.29	-0.37	-0.01
Correlação			0.998	0.997	1.000	1.000	0.999	0.999	0.999	0.998	1.000

Com estes coeficientes, é possível modelar a recuperação por classe no concentrado rougher 1. Os gráficos da figura 9.11 apresentam os dados.

Verifica-se que o coeficiente b para as partículas liberadas foi igual ou muito próximo a zero. Isto significa que, *para partículas liberadas*, a recuperação é proporcional unicamente à quantidade de material disponível nesta classe na alimentação.

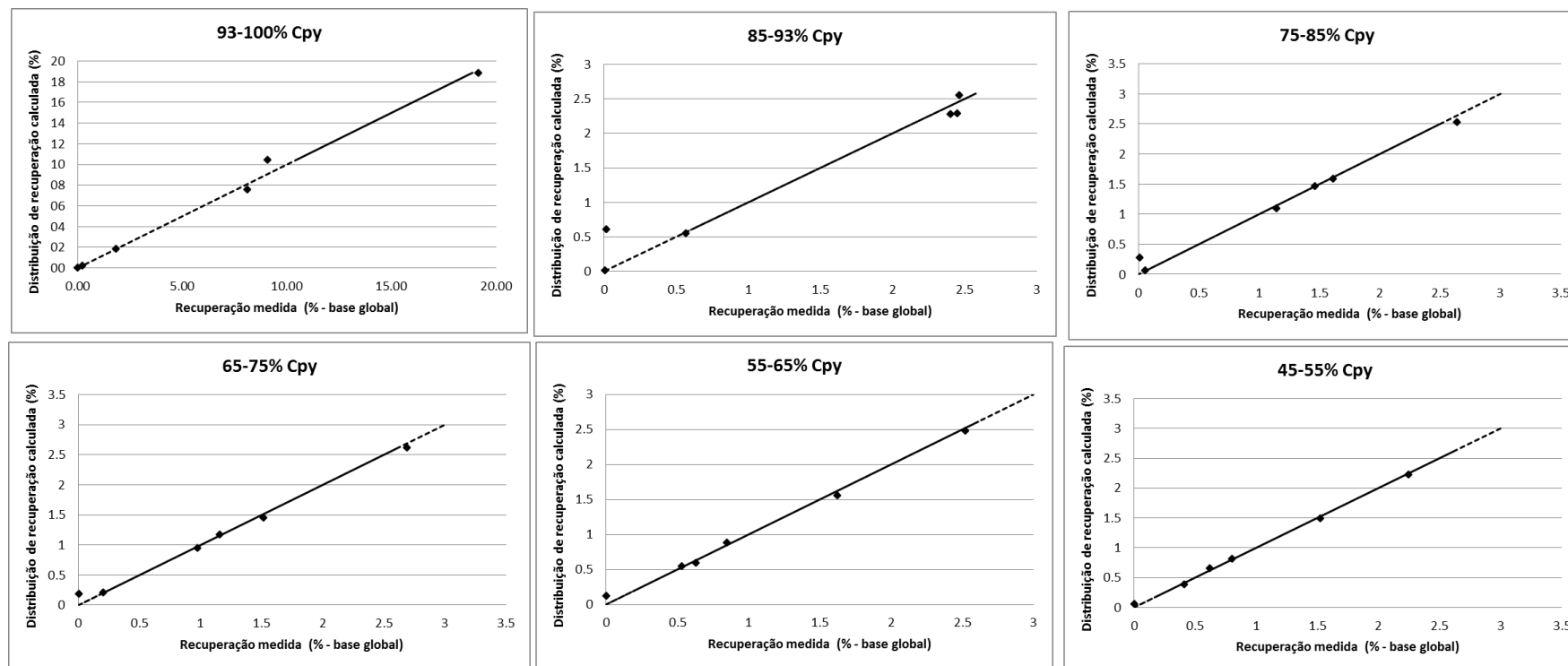


Figura 9.11 - Recuperação de calcopirita medida e calculada por classe de liberação no concentrado rougher 1

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A figura 9.12 apresenta os gráficos desta razão em função do tamanho de partículas para cada classe de liberação nas três condições de altura de espuma dos ensaios Cal 01, Cal 02, Cal 03.

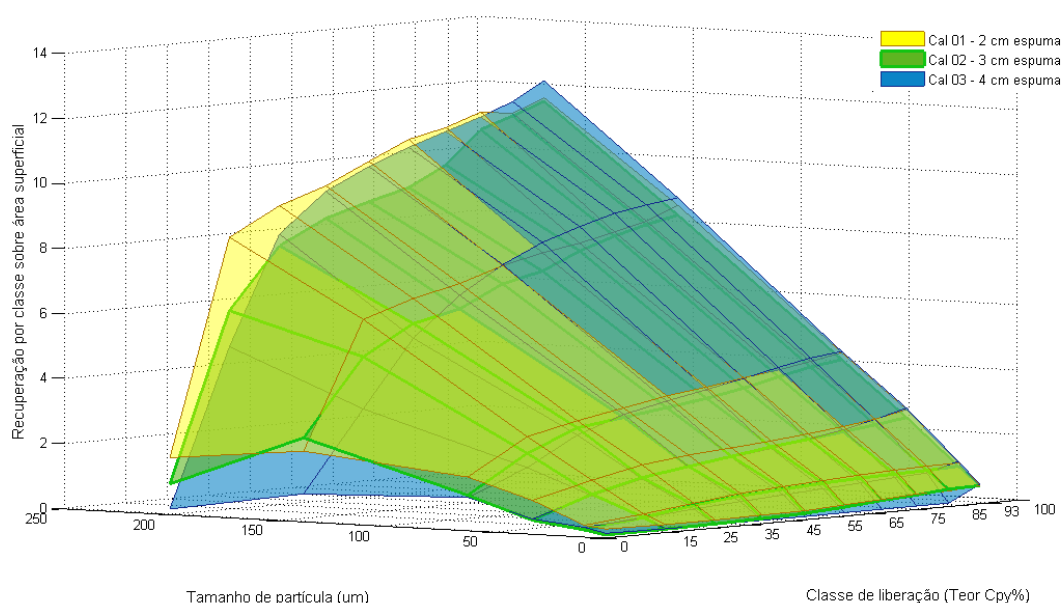


Figura 9.12 - Razão da recuperação de calcopirita por classe de liberação no concentrado rougher 1 sobre a distribuição de área superficial de calcopirita por classe de liberação na alimentação em função do tamanho de partícula para as três alturas de espuma

É notável que as retas sejam bastante próximas entre si para partículas mais hidrofóbicas nas três alturas de espuma. A recuperação sobre a área superficial de calcopirita foi ligeiramente superior para maior camada de espuma (Cal 03 – 4 cm) do que para a camada intermediária (Cal 02 – 3 cm de espuma), de modo consistente com a recuperação por classes.

Entre as três espessuras de espuma, a diferença na relação recuperação/superfície somente se torna mais evidente para a classe de teor médio de calcopirita igual e inferior a 20% (classe 15-25%), em que a maior altura de espuma provocou uma perda significativa de recuperação. Ainda assim, nesta classe, a relação linear é mantida.

Em suma, **a recuperação se mostrou diretamente relacionada com a área superficial de mineral hidrofóbico disponível para adesão, mesmo para partículas com até 20% de proporção de mineral.**

Para partículas com menor conteúdo de calcopirita, classe 0,1% a 15% cpy, a razão recuperação/superfície foi linear até o tamanho de 74 μm . Para partículas maiores, houve uma perda de recuperação efetiva nesta classe. O formato final da relação foi, aproximadamente, uma parábola, como mostra o gráfico da figura 9.13. O baixo conteúdo de calcopirita não deve ter sido suficiente para manter partículas grossas aderidas, ou em outras palavras, a força de adesão da pequena área superficial de calcopirita não foi suficiente para sobrepor o peso de partículas grossas. Há ainda uma maior possibilidade de que a calcopirita esteja inclusa e não disponível na superfície de partículas maiores.

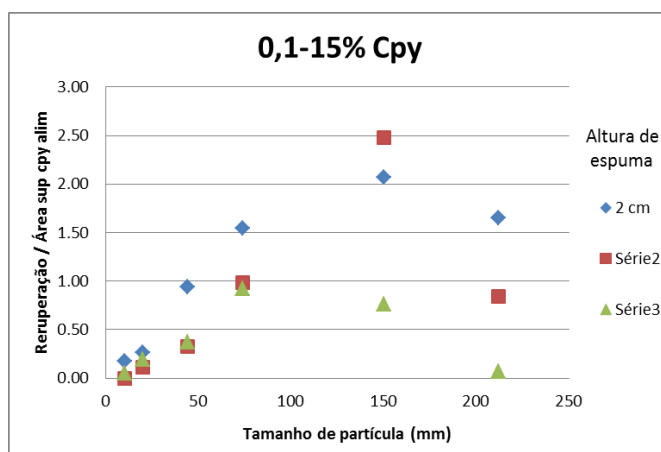


Figura 9.13 - Razão entre a recuperação de calcopirita por classe de liberação no concentrado rougher 1 e a distribuição de área superficial de calcopirita por classe de liberação na alimentação em função do tamanho de partícula para as três alturas de espuma para a classe com menor teor de calcopirita

É nesta classe de baixo teor que se observam as maiores diferenças entre as três alturas. Muito provavelmente, a espuma tem dificuldade em sustentar partículas mistas e grossas com baixo teor de mineral hidrofóbico e este efeito mostra-se bem mais pronunciado para espumas mais espessas, como seria de se esperar.

Estes resultados modificam um pouco a perspectiva do efeito do tamanho de partícula sobre a recuperação na flotação. Partículas grossas flotaram com menor recuperação mais pelo fato de que partículas de baixo teor representam uma proporção maior nestas frações de tamanho do que pela questão do peso das partículas por si só. Dito de outra forma,

considerando que o tamanho de partícula é adequado à flotação, a proporção de superfície de calcopirita nas partículas é que parece ser o determinante da capacidade de flotação. Como partículas grossas são menos liberadas e apresentam maior proporção de material com menor teor, no somatório da fração de tamanho, sua capacidade total de adesão e retenção nas bolhas é menor. Ao contrário, a proporção de material altamente hidrofóbico e liberado nos menores tamanhos costuma ser bem mais expressiva, favorecendo a flotação destas frações de tamanho.

Isto indica que a probabilidade de flotação deve estar diretamente relacionada à disponibilidade de superfície de mineral hidrofóbico, o que faz sentido.

Capítulo 10 - - Resultados – Parte 5 **Avaliação das etapas Rougher 1,** **Rougher 2 e Scavenger**

Conforme descrito na Metodologia, a principal diferença entre os ensaios correspondia à altura de espuma na primeira etapa rougher. Para as etapas rougher 2 e scavenger, as condições da Mini Planta haviam sido ajustadas de modo a garantir uma recuperação elevada ao final do processo. A ideia era demonstrar que uma mesma recuperação final poderia ser atingida com otimização das condições de processo. Em outras palavras, o efeito de aumentar a camada de espuma numa primeira etapa rougher – reduzindo a recuperação na primeira célula - deveria poder ser compensado nas outras etapas. Para isto, a camada de espuma foi progressivamente reduzida no rougher 2 entre o primeiro e o último ensaio. Além disto a aeração foi maior nesta etapa para os ensaios Cal 02 e Cal 03. Assim, o circuito foi capaz de gerar uma recuperação final bem semelhante. A figura 10.1 reapresenta o circuito ressaltando as etapas avaliadas neste capítulo.

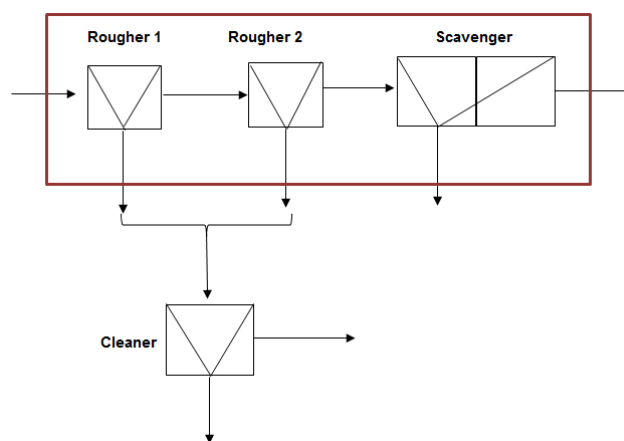


Figura 10.1 – Circuito utilizado nos ensaios e etapas avaliadas neste capítulo

Como o foco do uso do modelo dos compartimentos era a etapa rougher, somente para esta etapa havia sido realizada a calibração para determinar a recuperação na espuma. Como a recuperação na espuma mostrou-se muito dependente da hidrofobicidade das partículas, teria sido necessário calibrar a recuperação na espuma para as etapas rougher 2 e scavenger para que este modelo pudesse ser utilizado em toda a linha.

Não sendo este o caso, a avaliação desta linha de células em termos *globais* e por *fração granulométrica* poderia ser feita sem modelamento matemático ou com os modelos cinéticos convencionais. A avaliação *por classes de liberação* poderia ser feita com os dois modelos novos propostos neste trabalho.

Para a avaliação dos dados do minério global, havia questões interessantes: Qual o efeito da altura de espuma em uma simulação simples, com o modelo de cinética de primeira ordem? Qual o impacto disto nas aplicações deste tipo de modelo, particularmente em engenharia de novos equipamentos? Qual regime seria o mais adequado, mistura perfeita ou tubular? O que poderiam indicar as variações na cinética da flotação considerando o volume total da célula (sem separar polpa e espuma, como é utilizada correntemente) em função da altura de espuma no primeiro rougher?

Seria ótimo poder responder a estas questões diretamente utilizando os modelos cinéticos usuais e comparando os valores da constante cinética k . Entretanto, como já foi dito, as condições das etapas rougher 2 e scavenger foram diferentes entre os ensaios e foram ajustadas para garantir que a recuperação final na linha fosse equivalente. Graficamente, na curva cinética, isto significaria garantir que todas as três curvas terminassem o scavenger com o mesmo valor de recuperação, convergindo a um ponto máximo. Assim, forçosamente, o formato das curvas cinéticas seria distinto entre os ensaios, devido à mudança de condições.

De todo modo, as curvas cinéticas seriam uma boa forma de visualizar os resultados e compará-los. Ainda sabendo que as condições não foram semelhantes, a diferença entre as constantes ou curvas cinéticas indicariam, numericamente, o efeito desta abordagem de manter a recuperação na linha. Isto seria interessante porque esta é a abordagem típica da indústria: garantir a máxima recuperação nas etapas rougher e scavenger, com liberdade de alterar as condições intermediárias da melhor forma para o processo subsequente. Por esta razão, as curvas cinéticas foram ajustadas aos dados globais e de granulometria.

A avaliação por classe de liberação utilizou os modelos desenvolvidos neste trabalho, descritos no capítulo 9.

10.1 Resultados Globais

A tabela 10.1 e a figura 10.2 resumem os dados para as etapas rougher 1, rougher 2 e scavenger.

Tabela 10.1 - Resultados de teor de calcopirita e de recuperações de massa e de calcopirita para os estágios rougher e scavenger dos ensaios de calibração

Teste	altura espuma (cm)	Recup massas (%)			Recup massas (%) acumulada		
		Rougher 1	Rougher 2	Scav	Rougher 1	Rougher 2	Scav
Cal 01	2	10.1%	1.2%	4.0%	10.1%	11.3%	15.3%
Cal 02	3	8.7%	1.9%	1.8%	8.7%	10.6%	12.4%
Cal 03	4	7.7%	2.2%	2.6%	7.7%	9.8%	12.4%

Teste	altura espuma (cm)	Recup Cpy (%)			Recup Cpy (%) acumulada		
		Rougher 1	Rougher 2	Scav	Rougher 1	Rougher 2	Scav
Cal 01	2	84.7%	9.9%	2.9%	84.7%	94.6%	97.5%
Cal 02	3	82.0%	12.4%	2.7%	82.0%	94.4%	97.1%
Cal 03	4	81.2%	12.7%	2.8%	81.2%	93.9%	96.7%

Teste	altura espuma (cm)	Teor Cpy (%)			Teor Cpy (%) acumulado		
		Rougher 1	Rougher 2	Scav	Rougher 1	Rougher 2	Scav
Cal 01	2	51.1	49.5	4.4	51.1	50.9	38.7
Cal 02	3	58.4	39.4	9.2	58.4	54.9	48.3
Cal 03	4	65.3	36.3	6.6	65.3	58.9	48.0

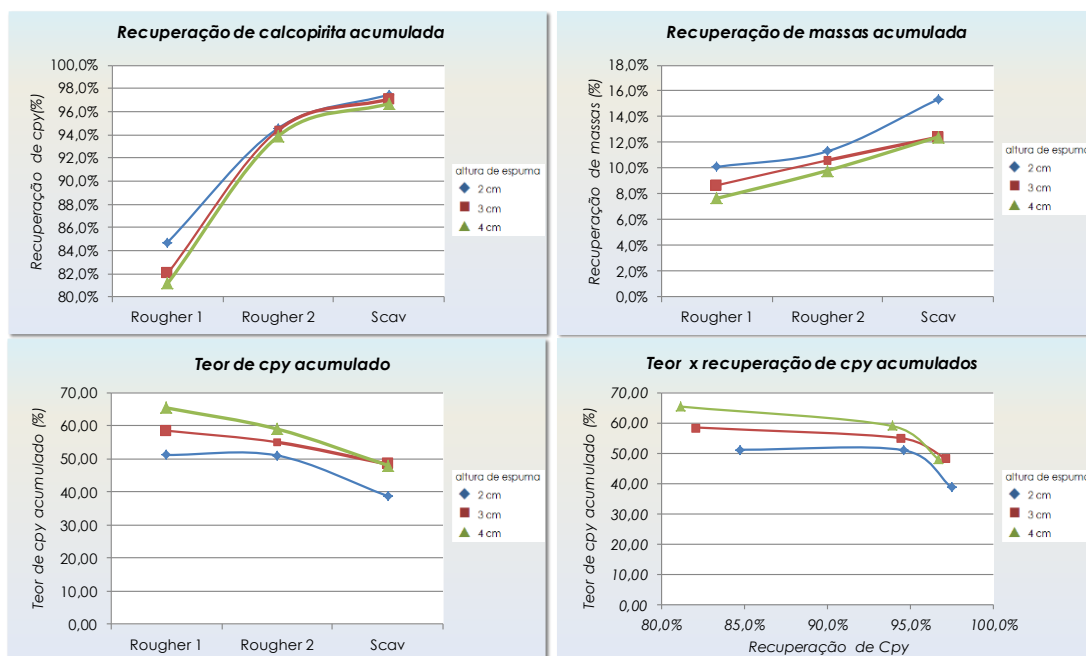


Figura 10.2 – Resultados de teor de calcopirita e de recuperações de massa e de calcopirita para os estágios rougher e scavenger dos ensaios de calibração

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

As recuperações de massas e de calcopirita acumuladas ao longo destes estágios convergiram para valores muito próximos, em torno de 94%, já no rougher 2. Isto significa que praticamente todo o material não flotado na primeira célula rougher foi recuperado na segunda célula, o que indica que o ajuste de altura de espuma e aeração foi efetivo para esta célula.

As recuperações totais, ao final da etapa scavenger, foram semelhantes, ao redor de 97%. Entretanto, uma ressalva é necessária em relação ao concentrado scavenger do primeiro ensaio, Cal 01, que gerou uma recuperação ligeiramente maior, igual a 97,5%, recuperação de massas bem maior e teor mais baixo, quase 10 pontos percentuais a menos que o teor médio dos outros dois ensaios. A última célula scavenger deste ensaio havia gerado um concentrado de teor muito baixo, igual a 4%, valor menor que o teor da alimentação inicial, de 6,2%. Para os ensaios seguintes, o nível desta célula da MPP foi alterado em alguns milímetros de tal modo que o último concentrado scavenger apresentasse enriquecimento. Assim, em parte, esta recuperação final maior no ensaio Cal 01 se deve a esta condição. Muito provavelmente, os teores e recuperações seriam ainda mais semelhantes ao final da linha.

10.2 Recuperação global– Modelos Cinéticos Convencionais

Modelos de cinética de primeira ordem são amplamente utilizados para determinação de tamanho e número de células para novos projetos e expansões. Além disto, são utilizados para simulação e otimização de processos. Estes dois propósitos são bem distintos. No primeiro, para novos projetos, as informações de processo são fixadas dentro de dois níveis: nominal e projeto. As simulações que utilizam estes dados tipicamente determinam a recuperação final da linha de células em cada etapa e definem o tamanho das células. Sabe-se bem que a realidade operacional permitirá ajustes de teor e recuperação, mas o objetivo principal é garantir que os equipamentos sejam capazes de tratar todo o material a ser alimentado com máxima recuperação gerando o teor especificado no projeto para o concentrado. No segundo propósito, otimização de processos, normalmente, o nível de informações e detalhamento é bem maior por que já há uma operação que gera dados para alimentar o modelo. Espera-se que o modelamento

auxilie a definir a melhoria do circuito através de mudanças estruturais ou de condições, com base nas possibilidades de gerar teor e recuperação, indicadas pela fórmula matemática calibrada do modelo.

Entre estas duas abordagens, o principal foco era avaliar o impacto sobre a simulação para novos projetos. Seria interessante verificar se o modelo geraria recuperações finais diferentes ou teria o grau de correlação modificado pelas diferentes condições. A ideia aqui é imaginar que, em vez das três curvas apresentadas, cada uma com uma altura de espuma no rougher, houvesse somente uma curva disponível, a curva média dos dados nominais de projeto. Seja considerada, *para este fim*, a curva do ensaio Cal 01 como a única existente. As outras duas representariam realidades possíveis, porém desconhecidas em um novo projeto. Qual seria o efeito se, na realidade, a curva mais representativa fosse uma das desconhecidas?

Antes, porém, para utilização do modelo simples no conjunto de ensaios, seria necessário definir de que modo utilizar o tempo de residência. Na definição do modelo dos compartimentos, utilizava-se uma região de coleta dentro da polpa, com um volume específico por célula, menor que o volume de polpa. Para os modelos convencionais, haveria a possibilidade de usar o volume total da célula, de usar somente o volume de polpa ou, ainda, de descontar ou não o volume do ar. Como o objetivo desta avaliação é comparar com os métodos utilizados em engenharia, optou-se pela opção mais simples, de utilizar o volume total da célula, igual a 967ml, sem descontar o ar⁶. A tabela 10.2 apresenta os tempos de residência.

⁶ Esta escolha é próxima da realidade de engenharia. Na grande maioria das vezes, principalmente para simulação de novos projetos e expansões, o volume de células é apenas reduzido por uma proporção fixa, cerca de 15%, para descontar o volume de ar. Assim, a título de comparação entre ensaios com a mesma base, não faz diferença descontar ou não o volume de ar. Além disto, neste tipo de simulação para projeto, é raro o uso em separado da espuma. Ao contrário, simulações para otimização tendem a ser bem mais detalhadas.

Tabela 10.2 – Tempos de residência nas células rougher e scavenger

	Tempo de residência acumulado (min)		
	Rougher 1	Rougher 2	Scav
Cal 01	3.3	7.2	15.3
Cal 02	3.4	7.0	14.8
Cal 03	3.4	7.0	14.7

O gráfico da figura 10.3 apresenta os resultados de modelamento cinético.

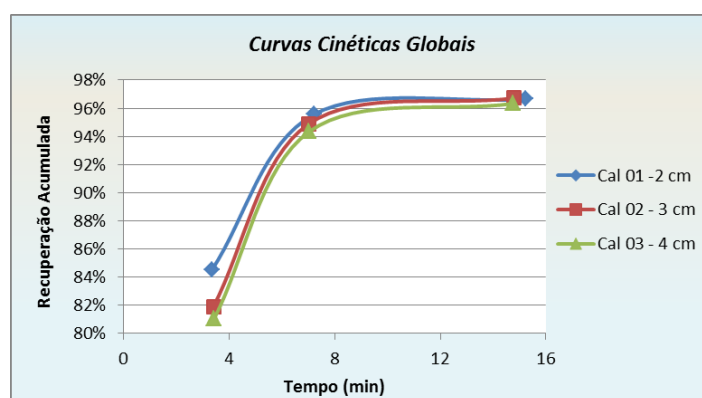


Figura 10.3 – Curvas cinéticas globais para os três ensaios nas etapas rougher 1, rougher 2 e scavenger

Para estas curvas, o modelo de regime tubular (Eq 4.5) proveu melhor ajuste, com fatores de correlação bem elevados, acima de 0,98. A tabela 10.3 apresenta os resultados.

$$R_t = 1 - \exp(-kt) \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Tabela 10.3 – Resultado do ajuste do modelo de cinética de primeira ordem em regime tubular para as etapas rougher e scavenger

	Resultados Ajuste de Cinética Regime Tubular		
	R max	k	R ²
Cal 01	96.7%	0.62	0.981
Cal 02	96.8%	0.55	0.998
Cal 03	96.5%	0.54	0.999

O modelo confirma que a recuperação máxima alcançada nas células em linha é de fato similar nos três casos. A recuperação máxima é o que costuma definir o *número de células em uma linha*, no caso do uso deste modelo em cálculos de engenharia de equipamentos industriais. Assim, considerando este tipo de aplicação, o uso do modelo cinético simples *não sofreu impacto* devido à utilização de uma maior ou menor espessura de espuma na

primeira célula e, quase certamente, não sofreria impacto relevante em relação à recuperação na espuma das demais células.

Por outro lado, houve uma grande diferença nos teores dos concentrados gerados nas etapas em função da espessura de espuma no primeiro rougher, os teores dos concentrados dos ensaios com espuma mais espessa foram significativamente maiores. A utilização de um modelo simples que não considerasse a espuma não permitiria verificar este efeito. Um modelo calibrado com uma pequena camada de espuma indicaria sempre um produto de teor menor no primeiro concentrado industrial. Isto não permitiria visualizar a possibilidade de alcançar um produto de teor bem mais elevado na primeira etapa rougher com o aumento da camada de espuma. Assim, apesar do ótimo ajuste aos dados, este modelo cinético utilizado para o volume total de polpa e espuma é limitado para uso em *otimização de processos ou definição de etapas intermediárias em uma linha* se for calibrado apenas uma vez em uma única condição de espuma.

A propósito do ajuste, interessante foi observar que este modelo de regime tubular (Eq 4.5) tenha sido mais compatível com os dados que o de mistura perfeita (Eq 4.7), mesmo com o circuito contínuo.

$$R = \frac{k\tau}{1+k\tau} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Este aspecto será comentado em maior detalhe em relação às frações granulométricas.

10.3 Recuperação por fração granulométrica nas etapas Rougher 1, Rougher 2 e Scavenger

A tabela 10.4 e os gráficos da figura 10.4 apresentam, para cada fração granulométrica, as recuperações acumuladas nas etapas rougher 1, rougher 2 e scavenger.

Tabela 10.4 - Recuperações acumuladas nas etapas rougher 1, rougher 2 e scavenger para cada fração granulométrica

Tamanho (μm)	Recuperações de calcopirita por fração granulométrica, acumuladas por etapa								
	Cal 01			Cal 02			Cal 03		
	Rougher 1	Rougher 2	Scav	Rougher 1	Rougher 2	Scav	Rougher 1	Rougher 2	Scav
212	84.0%	89.2%	91.9%	73.0%	86.7%	87.8%	70.4%	83.9%	85.8%
150	85.8%	94.8%	96.8%	83.3%	94.2%	96.0%	82.0%	92.1%	94.3%
74	86.6%	96.2%	98.2%	85.0%	96.5%	98.2%	84.0%	96.7%	97.7%
44	90.5%	97.8%	98.9%	86.7%	97.3%	98.7%	88.9%	96.4%	98.5%
20	87.0%	96.8%	98.8%	83.5%	96.4%	98.5%	85.0%	96.8%	98.9%
OF	69.3%	85.1%	94.4%	70.3%	85.8%	94.0%	62.8%	85.6%	94.1%
Global	84.7%	94.6%	97.5%	82.0%	94.4%	97.1%	81.2%	93.9%	96.7%
tempo de resid	3.3	3.9	8.0	3.4	3.6	7.8	3.4	3.6	7.7
t acum (min)	3.3	7.2	15.3	3.4	7	14.8	3.4	7.0	14.7

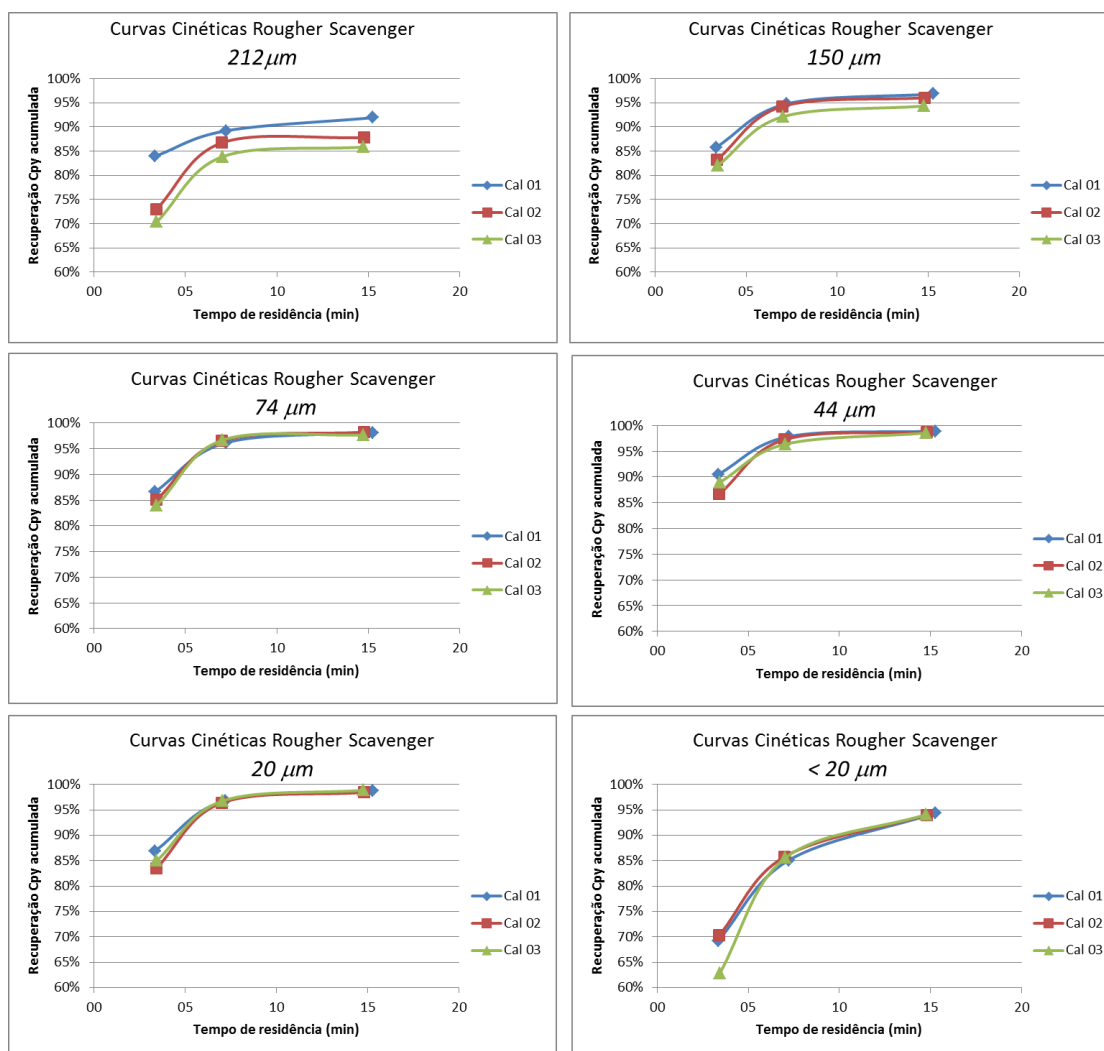


Figura 10.4 - Recuperações acumuladas nas etapas rougher 1, rougher 2 e scavenger para cada fração granulométrica

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Para as frações <20 até 74 μm , inclusive, o comportamento é muito semelhante ao do minério global: as diferenças de recuperação na primeira célula rougher são compensadas pela recuperação na etapa rougher 2. Somente nas frações grossas, 212 e 150 μm , parte da recuperação perdida na etapa rougher 1 não foi compensada, mesmo com o aumento da aeração e redução na camada de espuma na etapa rougher 2.

Embora, *por fração*, esta perda tenha sido de alguns pontos percentuais, na recuperação final, o impacto foi pequeno, menor que 0,8%. Isto porque a proporção de material grosso e a quantidade de calcopirita contida eram pequenas na alimentação. Os dados da figura 10.5 apresentam como a recuperação global e final na linha se distribui em cada fração e em cada etapa.

Tamanho (μm)	Recup Cpy base global		
	Rougher 1	Rougher 2	Scav
212	3.6%	0.7%	0.1%
150	9.0%	1.1%	0.2%
74	18.0%	2.7%	0.2%
44	15.8%	1.3%	0.4%
20	25.6%	3.5%	0.6%
OF	9.1%	3.3%	1.2%
Global	81.2%	12.7%	2.8%
tempo de resid (min)	3.4	3.6	7.7
t acum (min)	3.4	7.0	14.7

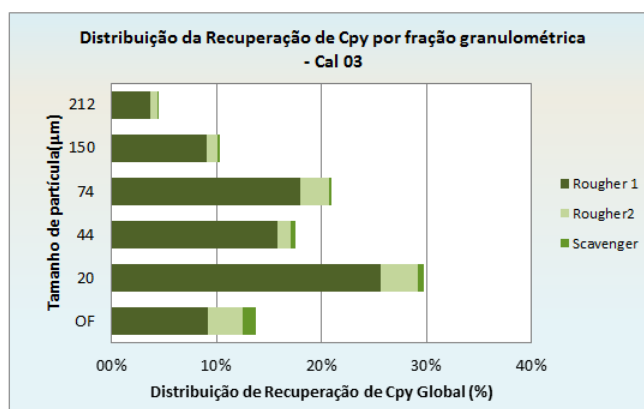


Figura 10.5 – Distribuição da recuperação global e final na linha em cada fração e em cada etapa para o ensaio Cal 03

Muito provavelmente, de modo similar ao visto na variação de altura de espuma, são as partículas grossas, mistas e com baixo teor de calcopirita que tem dificuldade de flotar nas etapas seguintes.

10.3.1 Recuperação por fração granulométrica – Modelos Cinéticos Convencionais

É interessante observar como os modelos cinéticos de primeira ordem se ajustam às recuperações acumuladas por fração granulométrica. A figura 10.6 exemplifica a

diferença típica encontrada nos formatos das curvas dos modelos de regime tubular e mistura perfeita.

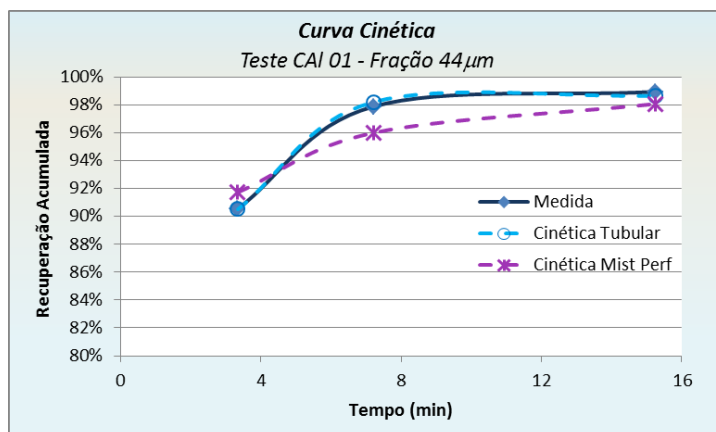


Figura 10.6 – Curva cinética da fração 44 mm do ensaio Cal 01 e curvas cinéticas modeladas pelos modelos de primeira ordem de regime tubular e de mistura perfeita

Para os três ensaios, o modelo de regime tubular também proveu melhor ajuste por fração granulométrica. Os gráficos das figuras 10.7 e 10.8 apresentam a correlação entre os dados medidos e os calculados com cada modelo para os três ensaios.

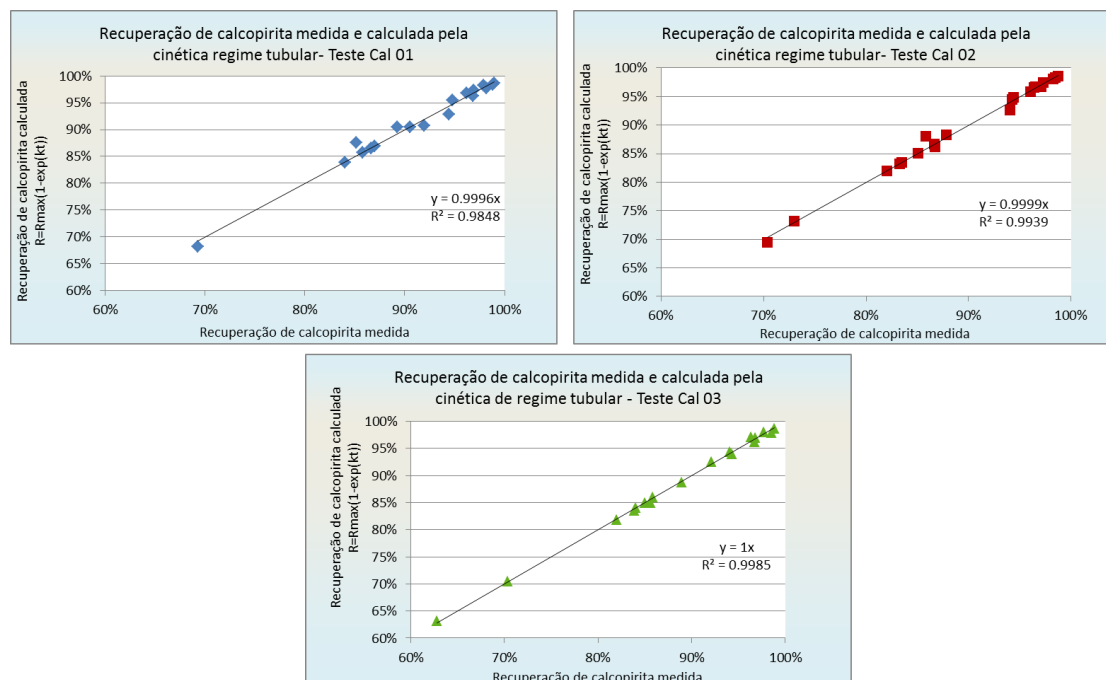


Figura 10.7 – Correlações entre valores de recuperações calculadas com o modelo cinético de regime tubular e recuperações medidas por fração granulométrica para os três ensaios.

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

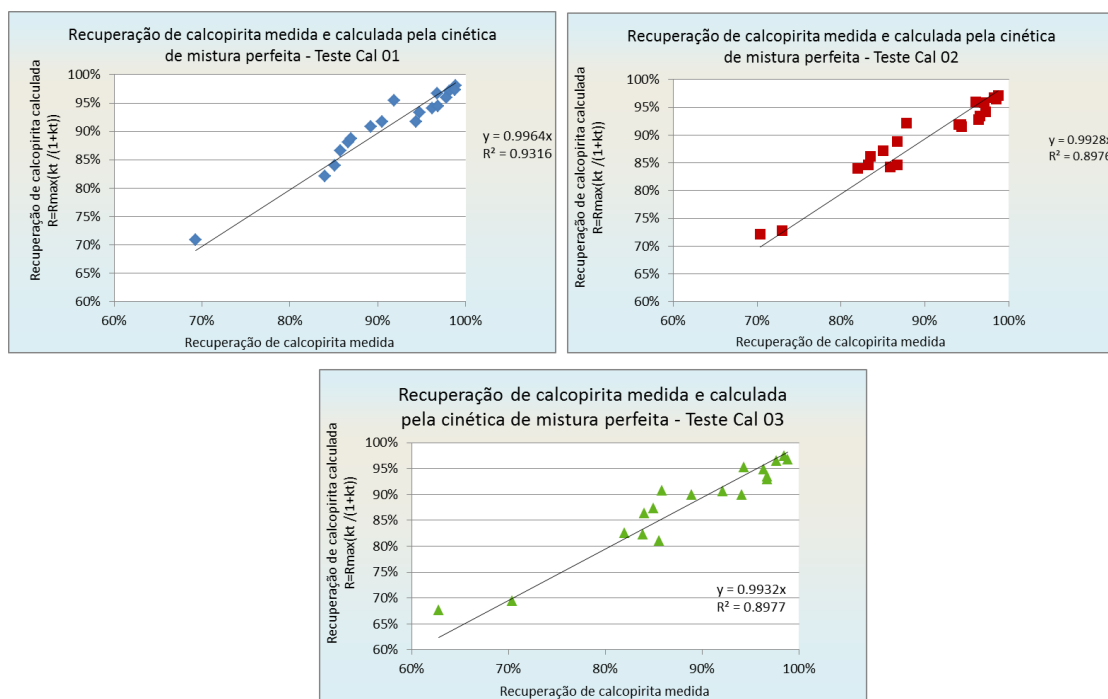


Figura 10.8 – Correlações entre valores de recuperações calculadas com o modelo cinético de mistura perfeita e recuperações medidas por fração granulométrica para os três ensaios.

A tabela 10.5 e o gráfico da figura 10.9 mostram como a soma dos quadrados das diferenças entre os dados medidos e calculados variou para cada altura de espuma na primeira etapa, para cada modelo.

Tabela 10.5 - Soma dos quadrados das diferenças entre as recuperações medidas e calculadas com os modelos convencionais

	Altura de espuma Rg1 (cm)	Soma dos quadrados das diferenças entre recuperações medidas e calculadas com modelo cinético	
		Tubular	Mistura Perfeita
Cal 01	2	0.0015	0.006
Cal 02	3	0.0009	0.011
Cal 03	4	0.0002	0.014

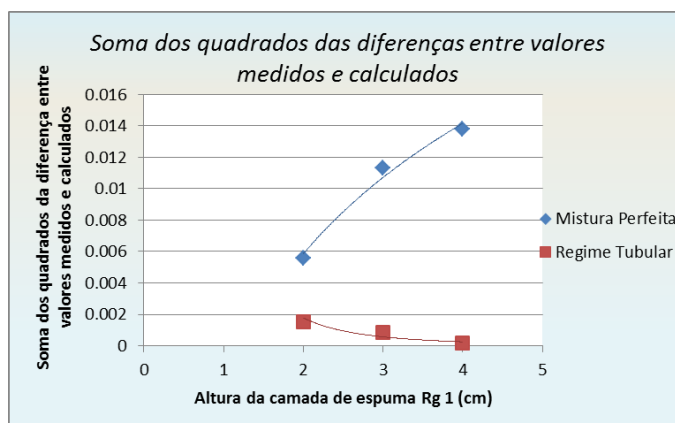


Figura 10.9 – Variação da soma dos quadrados das diferenças entre as recuperações medidas e calculadas com os modelos convencionais.

Este resultado parece compatível com o conceito de que a recuperação na polpa segue o regime de mistura perfeita e a recuperação na espuma segue o regime tubular, conforme indicado por Moys (1978).

Claro, há que se ressaltar que neste gráfico está sendo tratada a cinética na linha de células rougher 1, rougher 2 e scavenger. Deste modo, não se pode confundir a constante cinética destas curvas para o *volume total da linha de células* com a constante cinética k_{cz} da *zona de coleta de uma célula*. São parâmetros muito distintos. Entretanto, pensando em limites matemáticos, quando a espessura da camada de espuma tende a zero, a recuperação da espuma tende a 100% e a recuperação na célula tende à recuperação na zona de coleta. Este efeito é particularmente sentido na primeira célula, que condiciona grandemente o processo. Deste modo, se a tendência é de que, quanto menor a espuma no primeiro rougher, melhor é o ajuste da curva de mistura perfeita, então é sinal de que a recuperação na zona de coleta tende realmente a ser de mistura perfeita.

10.4 Recuperação por classes de liberação nas etapas rougher 1, rougher 2 e scavenger

10.4.1 Recuperação em relação à alimentação inicial

Os gráficos das figuras 10.10 e 10.11 apresentam os resultados de recuperação nas etapas rougher1, rougher 2 e scavenger para cada fração granulométrica do ensaio Cal 03, em relação à alimentação inicial.

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

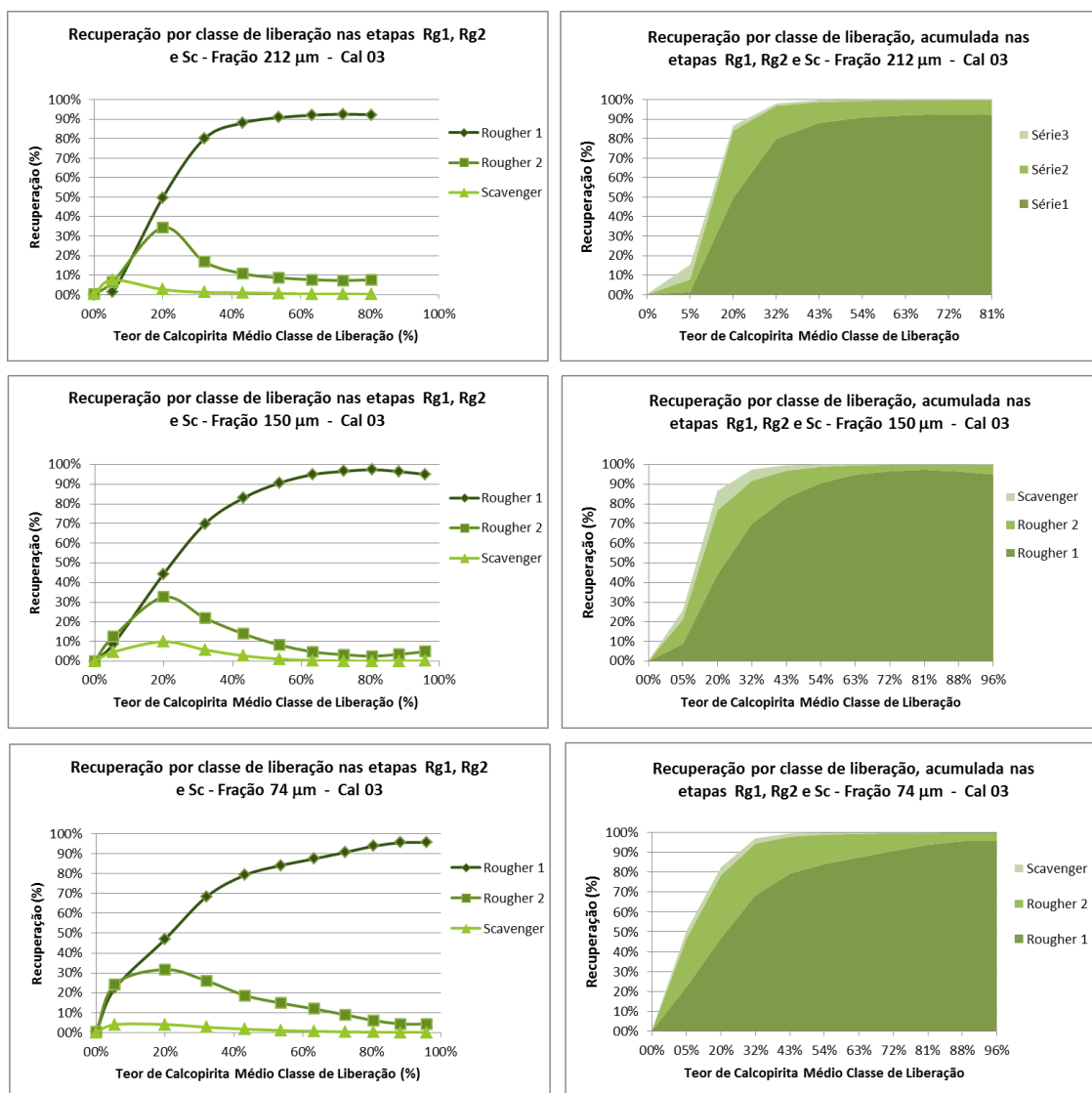


Figura 10.10 - Recuperação simples e acumulada nas etapas rougher1, rougher 2 e scavenger para as frações granulométricas 212,150 e 74μm. Lado esquerdo – recuperações em cada etapa. Lado direito – recuperações acumuladas

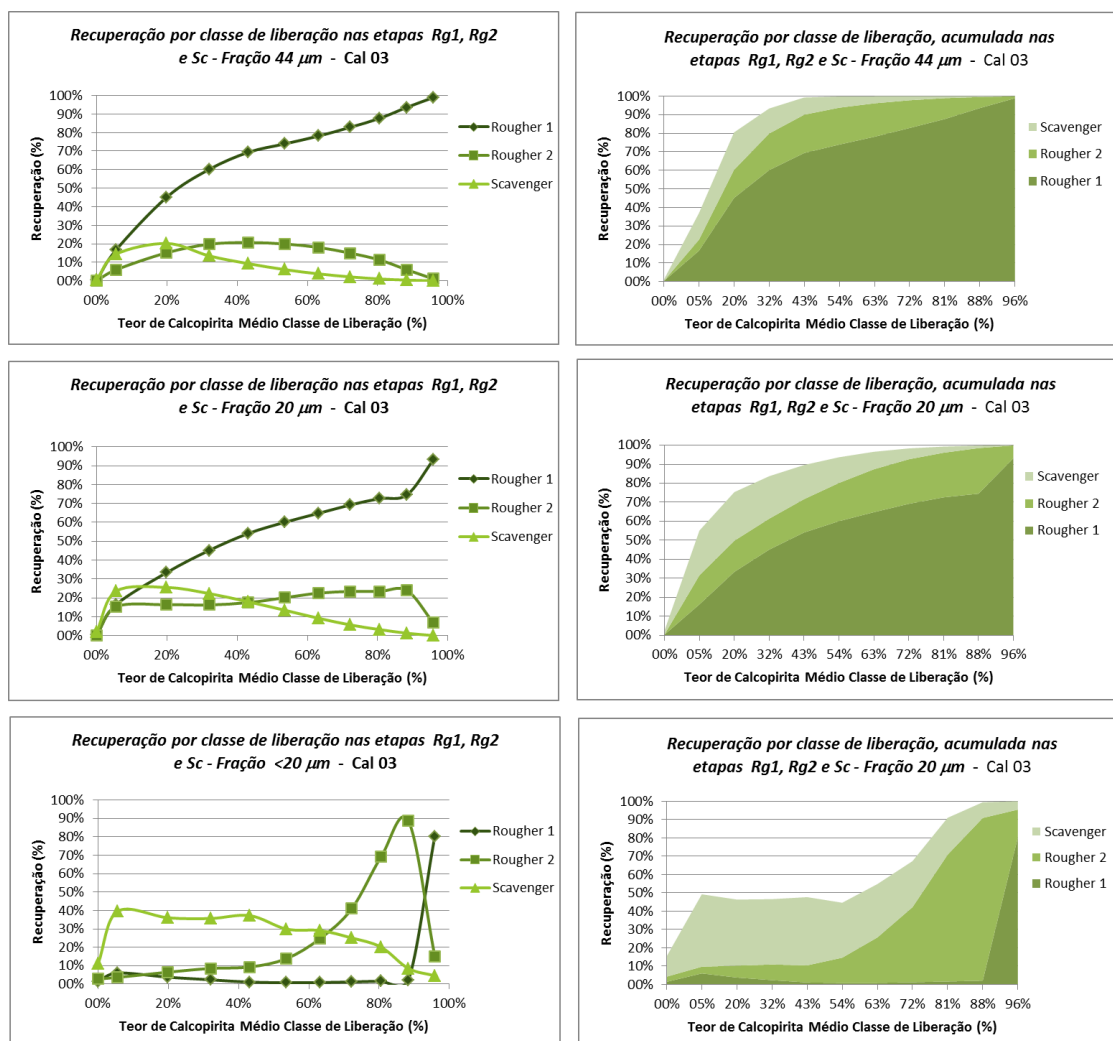


Figura 10.11 - Recuperação simples e acumulada nas etapas rougher1, rougher 2 e scavenger para as frações granulométricas 44, 20 e <20 μm . Lado esquerdo – recuperações em cada etapa. Lado direito – recuperações acumuladas

Quando calculadas em relação à alimentação fresca inicial, o formato das curvas de recuperação simples nas etapas rougher 2 e scavenger mostram de que forma estes estágios recuperam as partículas que não flotaram na etapa anterior. Os gráficos de recuperação acumulada permitem ver, em cada tamanho de partícula, como é o impacto relativo das etapas rougher 2 e scavenger na recuperação.

Para partículas grossas, acima de 74 μm , é o rougher 2 que possibilita a flotação de material misto não flotado no rougher 1. O scavenger contribui muito pouco. Em partículas finas, tanto o rougher 2 quanto o scavenger agregam ao concentrado. A menor recuperação de partículas finas no rougher foi progressivamente compensada com o

maior tempo de flotação nas etapas seguintes. Isto está de acordo com o conceito de que o problema de partículas finas é realmente a menor probabilidade de uma adesão efetiva. A observação interessante aqui é a de que este conceito é verdadeiro para partículas finas em geral, mas parece ser mais pronunciado para partículas finas e mistas.

10.4.2 Recuperação na etapa (em relação à alimentação da etapa) –Rougher 2

O rejeito rougher 1 alimenta a etapa rougher 2 e a distribuição de massas nas classes de liberação por fração granulométrica para o fluxo deste rejeito é mostrada na tabela 10.6.

Tabela 10.6 – Distribuição % em massa nas classes de liberação por fração granulométrica para o rejeito rougher 1 (alimentação do rougher 2)

Tamanho (μm)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											Total
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
	Distribuição % em massa por classe de liberação											
212	87.5	11.2	0.82	0.27	0.14	0.07	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	100
150	94.7	3.6	0.84	0.43	0.23	0.12	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01	100
74	95.7	1.7	1.01	0.55	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04	0.03	100
44	96.9	1.5	0.44	0.27	0.21	0.19	0.17	0.15	0.13	0.08	0.04	100
20	97.0	0.4	0.28	0.23	0.20	0.20	0.21	0.23	0.26	0.36	0.55	100
<20	97.0	0.0	0.06	0.12	0.22	0.32	0.35	0.29	0.28	0.42	0.97	100

Praticamente não há mais calcopirita liberada, com exceção das frações mais finas. Partículas grossas com maior teor também quase não estão presentes. Há maior quantidade de mistos e finos nas classes de menor teor.

Considerando esta alimentação como base de cálculo, as curvas de recuperação apresentaram formatos semelhantes aos do rougher 1, como mostra a figura 10.12.

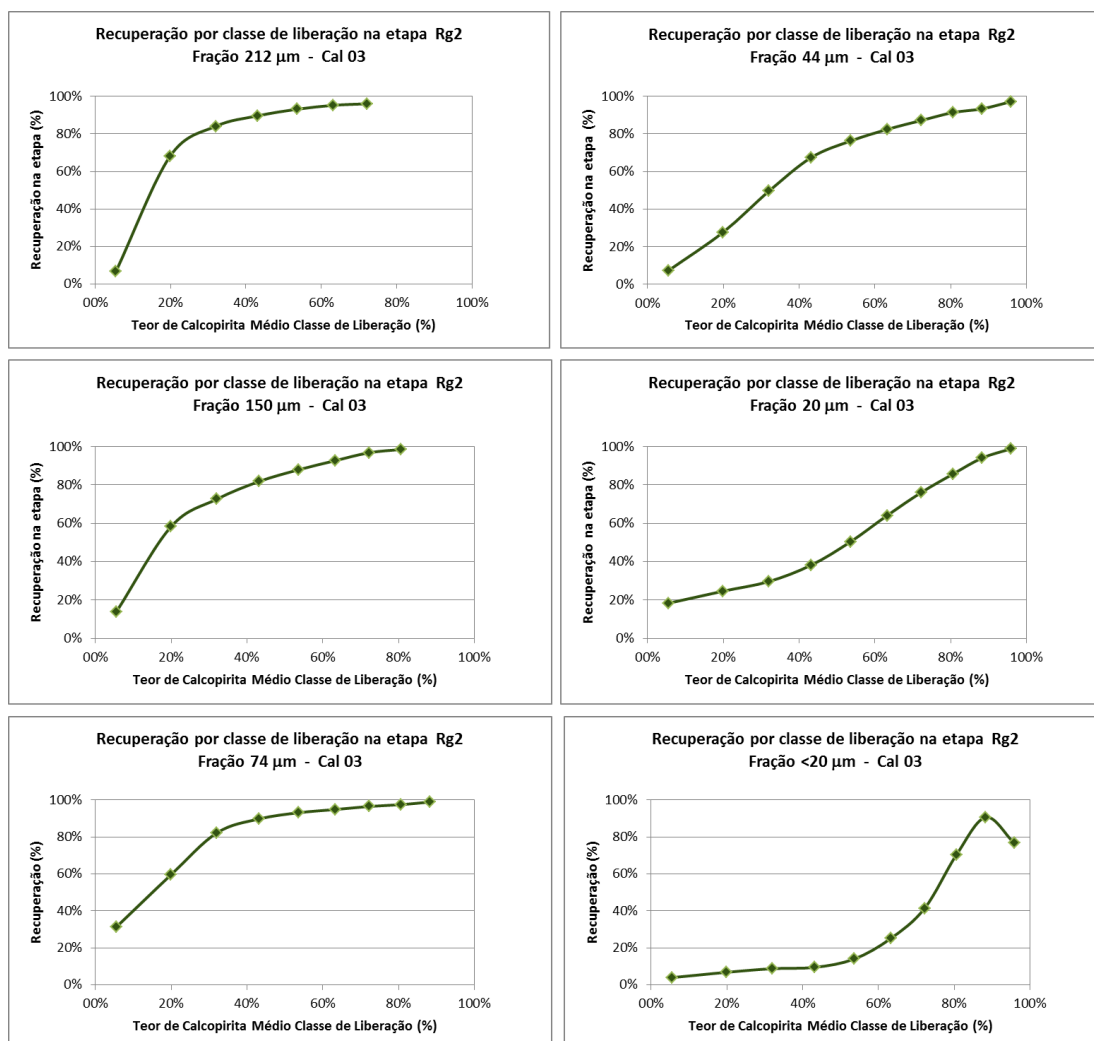


Figura 10.12 – Recuperações do rougher 2 nas classes de liberação em cada fração granulométrica em relação à alimentação do próprio rougher 2

Mesmo com uma quantidade menor de partículas nas classes com mais calcopirita – porque estas já haviam flotado no estágio anterior – os resultados indicam que a flotação seguiu sendo mais efetiva quanto maior o conteúdo mineralizado nas partículas, alcançando recuperações acima de 90% nestas classes.

10.4.3 Recuperação na etapa (em relação à alimentação da etapa) –Scavenger

A distribuição de massas nas classes de liberação por fração granulométrica para o fluxo do rejeito rougher 2 que alimenta o scavenger é mostrada na tabela 10.7.

Tabela 10.7 – Distribuição % em massa nas classes de liberação por fração granulométrica para o rejeito rougher 2 (alimentação do scavenger)

Tamanho (um)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											Total
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
	Distribuição % em massa por classe de liberação											
212	89.0	10.7	0.27	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
150	96.3	3.15	0.36	0.12	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
74	98.2	1.23	0.42	0.10	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
44	98.0	1.39	0.32	0.14	0.07	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	100.0
20	98.8	0.37	0.21	0.16	0.13	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	100.0
<20	98.5	0.03	0.06	0.12	0.21	0.29	0.27	0.18	0.09	0.04	0.24	100.0

O rejeito rougher 2 é composto predominantemente por partículas mistas, grossas, de baixo teor, possuindo ainda algum material fino não flotado nas etapas anteriores. Em função disto, o perfil de recuperações na etapa scavenger é um pouco distinto dos perfis das etapas anteriores, com recuperações mais baixas e quedas mais acentuadas de recuperação com a redução do teor das classes, refletindo a dificuldade de flotar este material. A figura 10.13 apresenta estes dados.

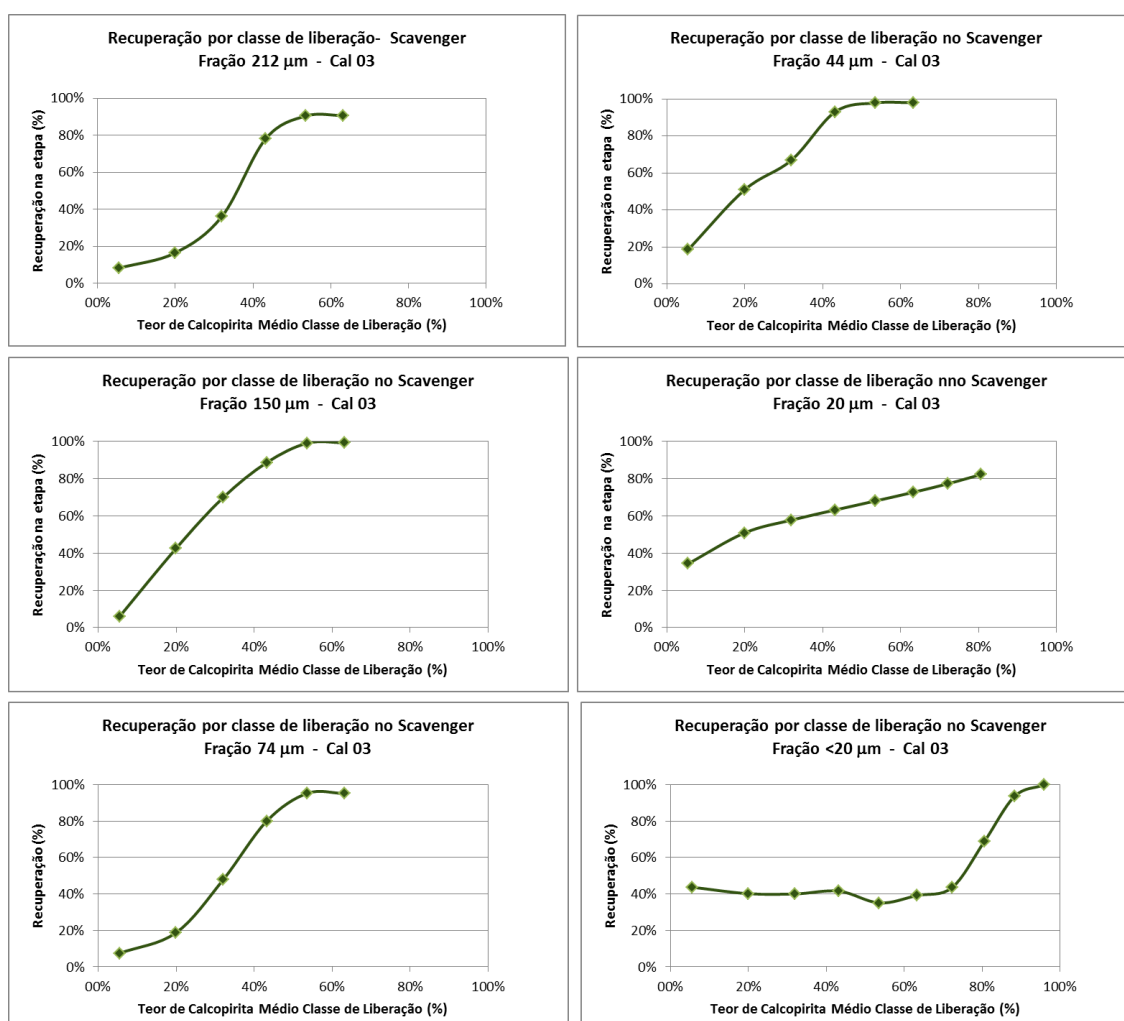


Figura 10.13— Recuperações do scavenger nas classes de liberação em cada fração granulométrica em relação à alimentação do próprio scavenger

10.4.4 Modelamento da recuperação por classes de liberação na etapa Rougher 2

Na avaliação para a linha de células, era importante verificar se os modelos desenvolvidos para a etapa rougher 1 seriam válidos também para as etapas rougher 2 e scavenger.

Para a avaliação do modelo matemático descrito pela equação 9.1, foi utilizada a curva de recuperação acumulada. Os dados de recuperação por classe de liberação para a etapa rougher 2 são apresentados na tabela 10.8 .

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

$$Rec_j = \Gamma \cdot e^{-\Psi \cdot \bar{g}_j} \cdot [1 - e^{-\Delta \cdot \bar{g}_j}] \quad (Eq. 9.1)$$

Tabela 10.8 – Recuperação acumulada por classe de liberação para a etapa rougher 2, ensaio Cal 03

Tamanho (um)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75-85%	85-93%	93-100%
	Recuperação acumulada por classe de liberação até a etapa Rougher 2										
212	0.12%	7.8%	84.0%	96.8%	98.8%	99.4%	99.6%	99.7%	99.8%	99.8%	99.9%
150	0.14%	21.3%	76.7%	91.7%	96.9%	98.9%	99.6%	99.9%	100.0%	100.0%	99.8%
74	0.40%	46.5%	78.5%	94.4%	97.9%	98.9%	99.4%	99.7%	99.8%	100.0%	99.9%
44	0.37%	22.6%	60.3%	79.9%	90.0%	93.8%	96.2%	97.8%	98.9%	99.6%	100.0%
20	0.62%	31.7%	49.8%	61.4%	71.7%	80.2%	87.4%	92.6%	96.1%	98.5%	99.9%
<20	4.27%	9.7%	10.3%	10.9%	10.4%	14.6%	25.7%	42.2%	70.8%	90.9%	95.4%

O modelo se ajustou bem a estas curvas, como pode ser visto na figura 10.14 .

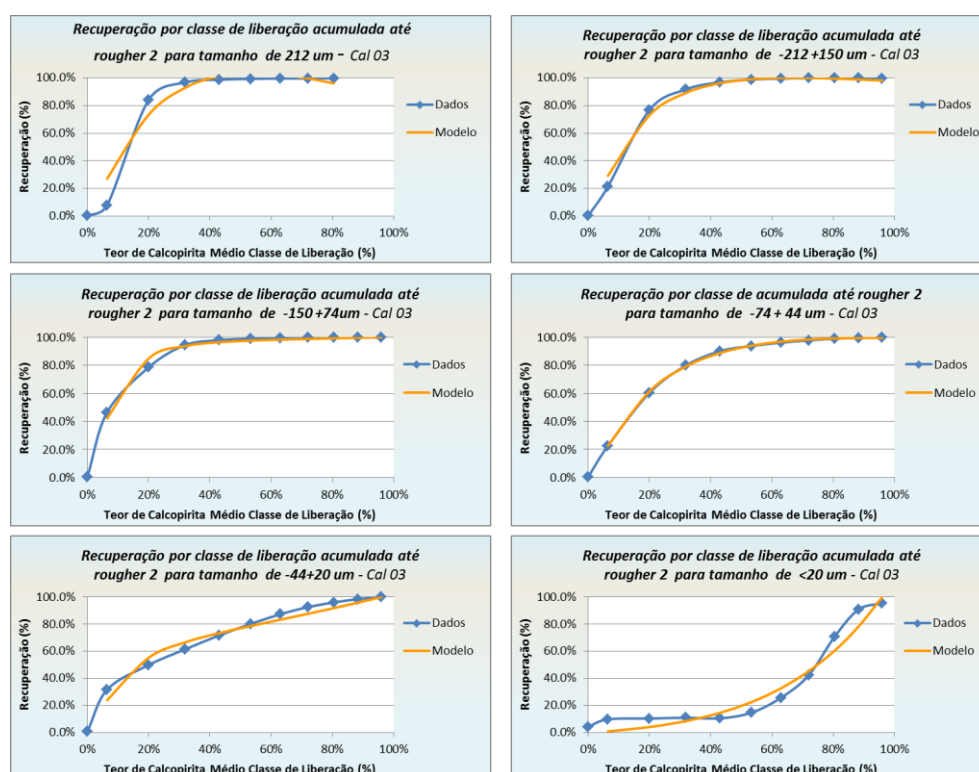


Figura 10.14 - Dados de recuperação medidos e dados ajustados com a equação de modelamento proposta (9.1) para cada fração granulométrica do concentrado rougher 2– Teste Cal 03 –

Quanto ao outro modelo, a distribuição da recuperação *na etapa rougher 2* por classe sobre a área superficial de calcopirita no rejeito rougher 1 mostrou relação linear para

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

partículas até 15-25%, ou seja, o modelo linear da equação 9.8 também foi válido na etapa rougher 2.

$$Rec\ Cpy_{i,j} = \frac{f_{mj\ alim.}^{***} \cdot ms_{i\ alim.}^{***} \cdot \bar{g}_{mj}^{***}}{\rho_j} \cdot 6 \cdot \left(\hat{a} + \frac{\hat{b}}{d_i} \right) \quad (Eq. 9.8)$$

A figura 10.15 apresenta o gráfico do fator de recuperação sobre a área superficial de calcopirita em relação ao tamanho de partícula .

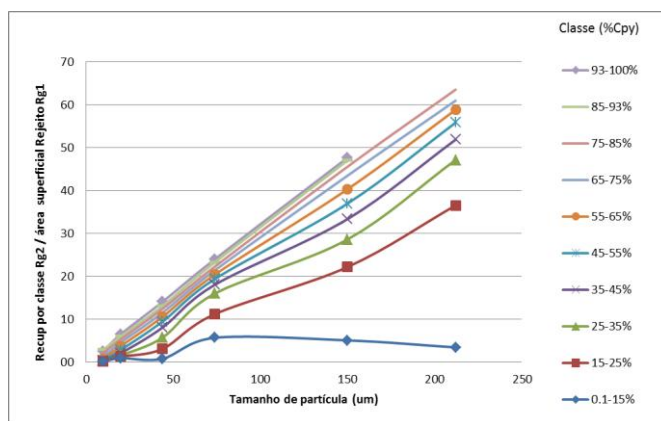


Figura 10.15 - Razão entre recuperação de calcopirita por classe de liberação e área superficial versus 7 do tamanho de partícula – Rougher 2 Teste Cal 03 –

Novamente, a relação foi linear para praticamente todas as classes. Apenas na fração 0,1-15% de calcopirita é que a relação perdeu a linearidade. O pouco conteúdo mineral nestas classes não foi capaz de manter partículas muito grossas aderidas.

A figura 10.16 apresenta os gráficos comparativos da distribuição de recuperação de calcopirita medida e calculada por classe de liberação no concentrado rougher 2. A figura 10.17 sumaria estes dados em um único gráfico

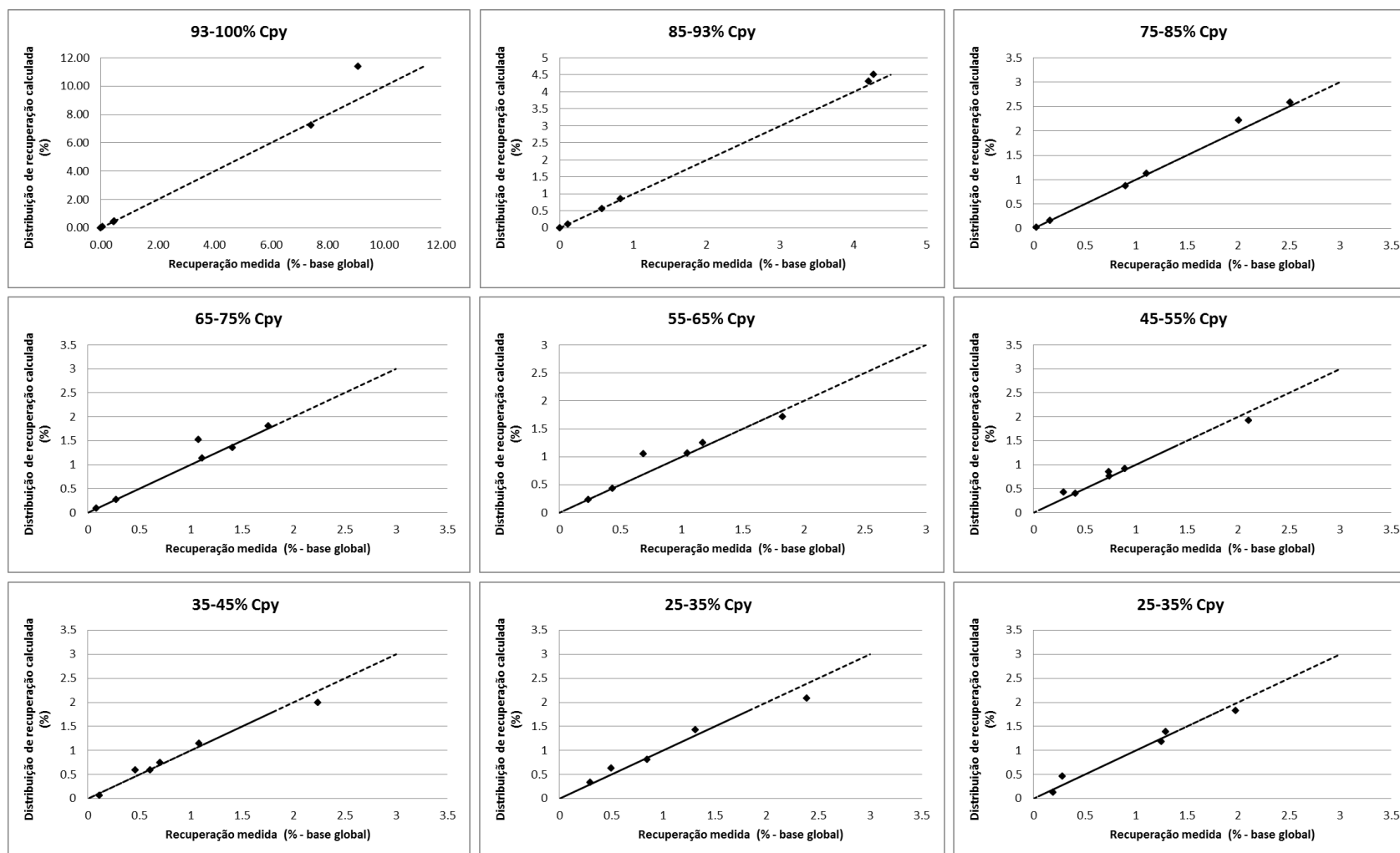


Figura 10.16 Distribuição de recuperação de calcopirita medida e calculada por classe de liberação no concentrado rougher 2

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

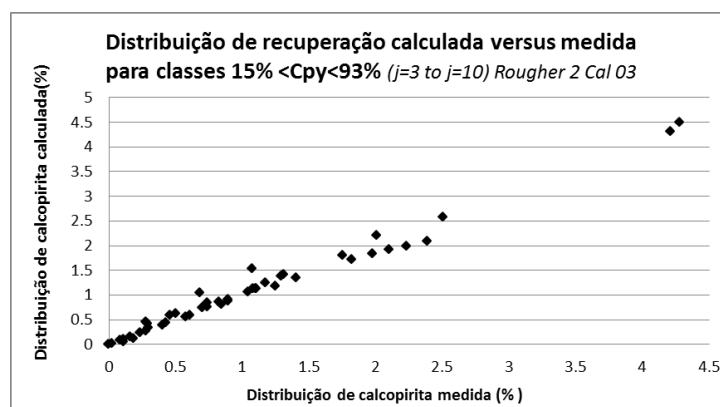


Figura 10.17 Distribuição de recuperação de calcopirita medida e calculada por classe de liberação no concentrado rougher 2 para todas as classes acima de 15% cpy.

Os coeficientes de inclinação $\hat{a}$ - mostrados na tabela 10.9 e calculados com tamanho de partícula em milímetros - foram muito superiores aos do concentrado rougher 1. Isto está de acordo com a recuperação elevada na etapa rougher 2, mesmo com uma quantidade bem menor de mineral disponível em várias classes.

Tabela 10.9 – Coeficientes das retas de ajuste da relação entre a distribuição de recuperação e a superfície de calcopirita

Classe de liberação	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Coeficiente a			176.1	225.5	249.5	268.7	283.0	293.3	303.4	316.4	320.5
Coeficiente b			-2.67	-2.73	-2.36	-2.12	-1.72	-1.17	-0.64	-0.41	-0.15
Correlação			0.994	0.995	0.998	0.999	1.000	1.000	1.000	0.998	1.000

Os coeficientes de interseção b destas curvas, em contrapartida, são bem menores, o que está de acordo com o fato de que no rougher 2, o tamanho de partícula tem impacto maior na redução da recuperação relativa da classe do que no rougher 1. Isto faz sentido porque a alimentação do rougher 2 possui maior proporção de material nas classes mistas e com menor teor de calcopirita.

10.4.5 Modelamento da recuperação por classes de liberação na etapa Scavenger

Para o scavenger, surpreendentemente, a linearidade ainda foi identificada. A pouca massa em classes mais hidrofóbicas em sua alimentação – o rejeito rougher 2 – torna difícil afirmar seguramente sobre a linearidade nas classes acima de 65% cpy, pela pouca precisão numérica. Entretanto, para as duas classes entre 45-65% cpy, a linearidade se

manteve, o que leva a supor que esta linearidade exista e se mantenha para classes com maior teor.

A figura 10.18 apresenta a relação recuperação/superfície em função do tamanho de partícula e a figura 10.19 mostra o gráfico comparativo da distribuição de recuperação de calcopirita medida e calculada por classe de liberação no scavenger.

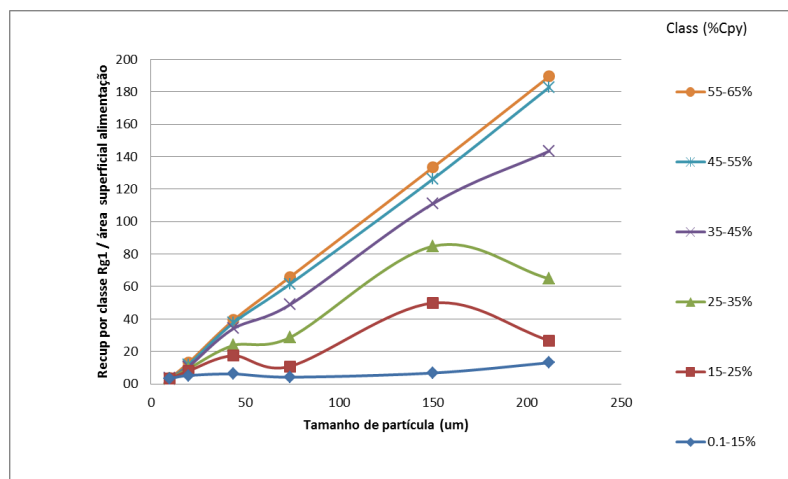


Figura 10.18 - Razão entre recuperação de calcopirita por classe de liberação e área superficial versus 7 do tamanho de partícula – Scavenger Teste Cal 03 –

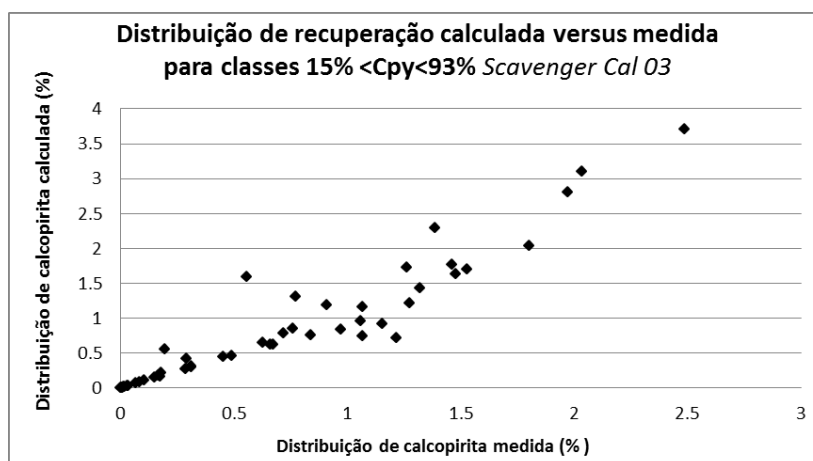


Figura 10.19 - Distribuição de recuperação de calcopirita medida e calculada por classe de liberação no scavenger para todas as classes acima de 15% cpy, ensaio Cal 03

Possuindo uma alimentação composta basicamente de material misto de baixo teor, o material restante na alimentação da etapa scavenger deve ter apresentado pouca calcopirita disponível na superfície da partícula. Isto conduziria a uma dificuldade de adesão e a uma menor resistência do agregado bolha- partícula, conduzindo a perda de recuperação mesmo em classes de teores maiores .

Estes dados atestam a aplicabilidade e utilidade do modelo desenvolvido para aplicação nas diversas etapas de flotação.

Capítulo 11 - Conclusões

“Caminhante, não há caminho; o caminho se faz ao andar.”

Antônio Machado

Este trabalho visava avaliar e modelar matematicamente o comportamento do minério por classes de liberação mineral por fração de tamanho em um *circuito contínuo*, utilizando um minério natural de calcopirita, processado em condições similares às industriais.

Em termos de características do minério, a liberação mineral é o parâmetro que estabelece a máxima eficiência possível em qualquer concentração mineral que envolva somente separação física. Isto coloca a liberação mineral no cerne das técnicas de modelamento e simulação. Entretanto, *as dificuldades de reconciliação de dados para fechamento de balanço, causadas por erros de amostragens e desvios estereológicos, sempre limitaram a representatividade dos dados*. Isto fazia com que a grande maioria dos estudos fosse realizada em condições ideais ou com minérios artificiais.

Por causa disto, ***a primeira parte deste estudo utilizou e aprimorou o método de Savassi de reconciliação de balanço de massas por classes de liberação utilizando a função beta e, com isto, alcançou reconciliação de dados até o nível de classes de liberação***. O aprimoramento do método foi feito através

- *da remoção somente da classe de ganga para reconciliar a curva beta às partículas mistas juntamente com a incorporação das partículas 100% liberadas a uma classe de alto teor com 90 a 100% de calcopirita*. Isto melhorou o ajuste geral da curva beta por todas as classes

- *de usar, como dados de entrada inicial, os teores das classes fornecidos pelo QEMScan em volume e a distribuição por classes já em massa. Assim, uma parte da correção estereológica – a primeira transformação de área para massa ou volume - é feita via QEMScan, o restante – a compatibilidade com o processo - sendo ajustado pela curva Beta.*
- *da inclusão de uma quarta função objetivo para ajuste da curva beta e*
- *da inclusão de pesos para ponderação da função objetivo total, para que a distribuição da ganga tivesse desvios mínimos em relação ao valor medido.*

Foi possível obter curvas beta representativas tanto dos dados de mineralogia quanto dos dados de processo.

Este método possibilitou a reconciliação do balanço de massas para todas as classes de liberação, de todos os fluxos dos três ensaios avaliados, de modo coerente, permitindo avaliações detalhadas do processo nas classes de liberação.

Na parte principal do estudo, para a avaliação e modelamento do processo de flotação, três ensaios de flotação direta de minério de cobre foram realizados num circuito aberto rougher 1 e 2, scavenger e cleaner, sendo que cada ensaio apresentava uma altura de espuma distinta na etapa rougher 1.

Entre os ensaios, quanto maior a altura de espuma na etapa rougher 1, maior foi o teor do concentrado (flotado) e menor a sua recuperação. A avaliação por classes de liberação demonstrou que esta maior concentração do mineral hidrofóbico em espumas mais espessas ocorreu por dois fatores:

- uma maior rejeição de ganga (material hidrofílico) livre na espuma e
- uma rejeição maior de partículas mistas de menor teor de mineral valioso (ou hidrofóbico) na espuma.

Por outro lado, especialmente para frações de tamanhos acima de 74 μ m, a recuperação de partículas de alto teor hidrofóbico (>60%cpy) na camada mais espessa de espuma

superou a recuperação de classes de mesmo teor nas camadas mais finas. A recirculação de partículas de elevada flotabilidade na espuma pode justificar este comportamento.

O material hidrofóbico ultrafino ($<20\mu\text{m}$) mostrou uma recuperação significativamente menor com o aumento de espuma. Isto pode ser atribuído à maior drenagem de água que carrega partículas finas de volta para a polpa.

Com estas características, ***a recuperação na espuma demonstrou ser um fenômeno bastante dependente e variável de acordo com o conteúdo mineral hidrofóbico nas partículas***, o que está consistente com outros estudos recentes nesta área.

Além disto, ***dois modelos matemáticos novos foram propostos para representar a recuperação por classes de tamanho e liberação***.

O primeiro destes modelos foi composto por uma relação matemática direta entre a recuperação e os teores médios das classes de liberação. Este modelo correspondeu à combinação de duas curvas exponenciais e apresentou ótimo ajuste ($R^2 > 90\%$) aos dados amostrados. Este modelo se ajustou bem para a recuperação na etapa rougher e para as recuperações acumuladas nas etapas rougher 2 e scavenger. Futuros desenvolvimentos podem ser interessantes para associar características físicas aos parâmetros matemáticos.

O segundo modelo foi desenvolvido a partir da razão entre ***a distribuição de recuperação por classes e a área superficial de calcopirita disponível na alimentação, nesta mesma classe***. Na etapa rougher 1, para partículas com teor acima de 15%, esta razão mostrou-se linear em relação ao diâmetro da partícula. Isto permitiu ***a elaboração de um modelo simples, direto e efetivo da recuperação, com uma correlação acima de 99% em relação aos dados e que demonstrou o quanto a flotação é dependente da superfície de mineral hidrofóbico***.

Este modelo apresentou excelente ajuste para todas as etapas, rougher 1, rougher 2 e scavenger, considerando-se a alimentação da etapa, para classes de maior teor. Para as classes de menor teor, uma parábola pode ser ajustada, completando o modelo em todo o espectro.

Este modelo, bem como o conceito e os métodos que o compõem, dados os níveis de correlação, é uma excelente base para a análise e comparação de condições de processo, táticas de controle, novos equipamentos, flotação flash e configurações diferentes de circuitos. Além disto, este modelo provê uma base sólida para avaliar a efetividade de moagem e flotação e pode ser incluído em estratégias de otimização mina-usina com eficácia, em usinas que consigam manter uma operação estável.

Capítulo 12 - Contribuições Originais ao Conhecimento

Este trabalho contribui para o conhecimento da flotação, de modo original, através:

- Do ***aprimoramento realizado no método de balanços de massas por classe de tamanho-liberação***, que passou a proporcionar maior representatividade do balanço para as classes de liberação, melhorando o ajuste como um todo.
- Da ***demonstração detalhada do comportamento das classes de tamanho e liberação dentro de um circuito contínuo, com minério real*** (e não artificial), ***processado em condições de % de sólidos, granulometria e reagentes similares às industriais***.
- Da elaboração de ***dois novos modelos matemáticos para o processo flotação por classe de tamanho e liberação***. Estes novos modelos trazem novas fórmulas matemáticas para a recuperação por classes de tamanho liberação bem como esclarecem a forma como a recuperação está associada à superfície mineral hidrofóbica disponível no mineral. Os resultados demonstram, matematicamente, como é o efeito do comportamento das classes de liberação no processo de flotação.

Referências Bibliográficas

- Aktas, Z., Cilliers, J., & Banford, A. (2008). Dynamic froth stability: Particle size, airflow rate. *Int. J. Miner. Process.*, pp. 65-71.
- Albijan, B., Subasinghe, G., Bradshaw, D., & Nguyen, A. (2015). Influence of liberation on bubble–particle attachment time in flotation. *Minerals Engineering*, pp. 156-162.
- Alexander, D., & Morrison, R. (1998). Rapid estimation of floatability components in industrial flotation plants. *Minerals Engineering*, 11, pp. 133-143.
- Alexander, D., Franzidis, J., & Manlapig, E. (2003). Froth recovery measurement in plant scale flotation cells. *Minerals Engineering*, 16, 1197-1203.
- Amenluxen, R., & Amenluxen, P. (2009). Methodology for using laboratory kinetic flotation parameters for plant design and optimization. *Proceedings of the VI International Mineral Processing Seminar, PROCEMIN 2009*, (pp. 357-365). Santiago, Chile.
- Ata, S. (2012). Phenomena in the froth phase of flotation — A review. *Int. Journ. Min. Process.*, 1-12.
- Ata, S., & Jameson, J. (2005). The formation of bubble cluster in flotation cells. *Int. J. Miner. Process*, 76, pp. 123-139.
- Barbery, G. (1991). *Mineral Liberation Measurement, Simulation and Practical Use in Mineral Processing*. Quebec: Les Editions, G.B.
- Bishop, J., & White, M. (1976). Study of particle entrainment in flotation froths. *Trans AIME*, 85, pp. 191-194.
- Bisshop, J., & White, M. (1976). Study of particle entrainment in flotation froths. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 191-194.
- Brozek, M., & Mlynarczykowska, A. (2007). Analysis of kinetics models of batch flotation. 41, pp. 51-65.
- Crawford, R., & Ralston, J. (1988). The influence of particle size and contact angle in mineral flotation. *Int. J. Miner. Process*, 23, pp. 1-24.
- Dippenaar, A. (1982). The destabilization of froth by solids. I. The mechanism of film rupture. *Int. J. Miner. Process.*, pp. 1-14.

- Dobby, G., & Savassi, O. (2005). An advanced modeling technique for scale-up of batch flotation results to plant metallurgical performance. *Proceedings of the Centenary of Flotation Symposium*, (pp. 99-103). Brisbane, Australia.
- Falutsu, M., & Dobby, G. (1992). Froth Performance in conventional sized columns. *Minerals Engineering*, 1207-1223.
- Fandrich, R., Schneider, C., & Gay, S. (1998). Two Stereological correction methods: allocation method and kernel transformation method. *Minerals Engineering*, 11, 707-715.
- Farrokhpay, S., & Fornasiero, D. (2017). Flotation of coarse composite particles: Effect of mineral liberation and phase distribution. *Advanced Powder Technology*, pp. 1849-1854.
- Feng, D., & Aldrich, C. (1999). Effect of particle size on flotation performance of complex sulphide ores. *Minerals Engineering*, pp. 721-731.
- Feteris, S., Frew, J., & Jowett, A. (1987). Modeling the effect of froth depth in flotation. *Int. Journ. Min. Process.*, 121-135.
- Finch, J., & Dobby, G. (1990). *Column Flotation*. London, UK: Pergamon Press.
- Flint, L. (1974). A mechanistic approach to flotation kinetics. *Trans*, 83, pp. 90-95.
- Gaudin, A. (1939). *Principles of Mineral Processing*. New York: Mc Graw Hill.
- Gaudin, A. (1957). *Flotation*. New York: Mc Graw Hill.
- Gay, S. (1995). Stereological corrections for phases within particles. *J. Microsc.*, 297-305.
- Goes, M., Luz, A., & Possa, M. (2004). CT2004-180-00: Comunicação Técnica Elaborada Para a 4a. Edição Do Livro de Tratamento de Minérios - Capítulo 2 - Amostragem. Em *Tratamento de Minérios* (pp. 19-51).
- Gorain, B., Burgess, F., Franzidis, J., & Manlapig, E. (6 - 8 October 1997). Bubble Surface Area Flux - A New Criterion for Flotation Scale-up. *Sixth Mill Operators' Conference* (pp. 141-148). Mandang - Papua New Guinea: AUSIMM.
- Gorain, B., Harris, M., Franzidis, J., & Manlapig, E. (1998). The effect of froth residence time on the kinetics of flotation. *Minerals Engineering*, 627-638.
- Harris, C. (1978). Multiphase models of flotation machines behaviour. *Int J Miner Process*, 5, pp. 107-129.
- Huber-Panu, I., Ene-Danalache, E., & Cojocario, D. (1976). Mathematical models of batch and continuous flotation. Em *Flotation, A.M Gaudin Memorial Volume* (Vol. 2, pp. 675-724). New York.

- Jonhson, N., McKee, D., & Lynch, A. (1974). Flotation Rates of non sulphide minerals in chalcopyrite flotation processes. *Trans. AIME*.
- Kelsall, D. (1961). Application of probability in the assessment of flotation systems. *Trans.Inst.Min.Met*, 70, pp. 191-204.
- King, R. (1976). The use of simulation in the design and modification. Em M. Fuerstenau (Ed.), *Flotation, A.M. Gaudin Memorial Volume* (Vol. 2, pp. 937– 962). New York: AIME.
- King, R. (2001). *Modeling and Simulation od Mineral Processing Systems* (1 ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- King, R., & Schneider, C. (1997). Comparison of stereological correction procedures for liberation measurements. *TransIMM*, 104, 155-161.
- Kirjavainen, V. (1996). Review and analysis of factors controlling the mechanical flotation of gangue minerals. *Int. J. Miner. Process*, pp. 21-34.
- Klassen, V., & Mokrousov, V. (1963). *An introduction to the theory of flotation*. London: Butterworths.
- Klimpel, R. (1982). Selection of Chemical Reagents for Flotation. Em A. Mular, & R. Bhappu (Eds.), *Mineral Processing Plant Design* (pp. 907-934). New York: SME-AIME.
- Koh, P., & Schwarz, M. (2007). CFD model of a self-aerating flotation cell. *Int. J. Miner. Process*, 85, pp. 16-24.
- Lange, A., Skinner, W., & Smart, R. (1997). Coarse particle interactions and aggregation in sphalerite flotation. *Minerals Engineering*, pp. 681-693.
- Lapante, A., Kaya, M., & Smith, H. (1989). The effect of froth on flotation kinetics - a mass transfer approach. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 147-168.
- Loveday, B. (1966). Analysis of froth flotation kinetics. *Trans.IMM.* , 75, pp. C219-C225.
- Lynch, A., Johnson, N., Manlapig, E., & Thorne, C. (1981). *Mineral and Coal Flotation Circuits Their Simulation and Control*. (D. Fuerstenau, Ed.) Amsterdam: Elsevier.
- Mao, L., & Yoon, R. (1997). Predicting flotation rates using a rate equation derived from first principles. *Int. J. Miner. Process.*, 51, pp. 171-181.
- Mendez, D., Gálvez , E., & Cisternas, L. (2009). State of the art in the conceptual design of flotation circuits. *Int. J. Miner. Process*, 90, pp. 1-15.
- Moys, M. (1984). Residence time distributions and mass transport in the froth phase of the flotation process. *Int. Journ. Min. Process.*, 117-142.

- Muganda, S., Zanin, M., & S.R., G. (2011). Influence of particle size and contact angle on the flotation of chalcopyrite in a laboratory batch flotation cell. *International Journal of Mineral Processing*, pp. 150-162.
- Pyke, B., Duan, J., Fornasiero, D., & Ralston, J. (2003). From turbulence and collision to attachment and detachment: A general flotation model. *Proc of the Strategic Conference Flotation and Flocculation: From Fundamentals to Applications*. Australia: Snap Printing.
- Rahman, R. M., Ata, S., & Jameson, G. (2012). The effect of flotation variables on the recovery of different particle size fractions in the froth and the pulp. *International Journal of Mineral Processing*, pp. 70-77.
- Reyes, F., Cilliers, J., & Neethling, S. (2018). Quantifying Mineral Liberation by Particle Grade and Surface Exposure Using X-Ray MicroCT. *Minerals Engineering*, pp. 75-82.
- Ross, V. (1991). The behaviour of particles in flotation froths. *Minerals Engineering*, 4, pp. 959-974.
- Santos, N. (2017). Modeling recoveries per size liberation classes using the particle surface area. *Flotation 2017*. Cape Town.
- Santos, N. A., & Galery, R. (2017 a). Minimizing the propagation of experimental errors in the estimate of flotation recovery of size-liberation classes using Savassi's method. *Flotation 2017*. Cape Town - South Africa.
- Santos, N. A., & Galery, R. (2017 b). Evaluating flotation per size liberation classes. *Flotation 2017*. CapeTown - South Africa.
- Santos, N., Savassi, O., Peres, A., & Martins, A. (2014). Modeling flotation with a flexible approach - Integrating different models to the compartment model. *Minerals Engineering*, pp. 68-76.
- Savassi, O. (2004). Planilhas de cálculo de ajuste beta em arquivo excel. Comunicação Pessoal.
- Savassi, O. (2005). A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell. *Int. J. Miner. Process.*, 77, pp. 65-79.
- Savassi, O. (2006). Estimating the recovery of size-liberation classes in industrial flotation cells: A simple technique for minimizing the propagation of the experimental error. *Int. J. Miner. Process.*, 85-92.
- Savassi, O., Alexander, D., Franzidis, J., & Manlapig, E. (1998). An empirical model for entrainment in industrial flotation plants. *Minerals Engineering*, 11, pp. 243-256.
- Savassi, O., Alexander, D., Franzidis, J., & Manlapig, E. (1998). An Empirical Model for Entrainment in Industrial Flotation Plants. *Minerals Engineering*, 11, pp. 243-256.

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

- Savassi, O., Alexander, D., Johnson, N., Franzidis, J., & Manlapig, E. (1997). Measurement of froth recovery of attached particles in industrial flotation cells. *Proceedings of the Sixth Mill Operators Conference*, 149-155.
- Schuhmann, R. (1942). Flotation Kinetics I. Methods for steady state study of flotation problems. *46*, pp. 891-902.
- Seaman, D., Franzidis, J., & Manlapig, E. (2004). Bubble load measurement in the pulp zone of industrial flotation machines—a new device for determining the froth recovery of attached particles. *Int. Journ. Min. Process.*, *74*, 1-13.
- Seaman, D., Manlapig, E., & Franzidis, J.-P. (2006). Selective transport of attached particles across the pulp-froth interface. *Minerals Engineering*, pp. 841-851.
- Smart, R., Amarantidis, J., Skinner, W., Prestidge, C., Vanier, L., & Grano, S. (2003). Surface Analytical Studies of Oxidation and Collector Adsorption in Sulfide Mineral Flotation. *Topics in Applied Physics*, *85*, pp. 3-62.
- Spencer, S., & Sutherland, D. (2000). Stereological correction of mineral liberation grade distributions estimated by single sectioning of particles. *Image Anal Stereol*, *19*, 175-182.
- Subrahmanyam, T., & Fossberg, E. (1988). Froth Stability, Particle Entrainment and Drainage in Flotation – A Review. *Int. Journ. Min. Process*, *23*, pp. 33-53.
- Sutherland, D. (1989). Batch flotation behaviour of composite particles. *Minerals Engineering*, *2*, pp. 351-367.
- Tomlinson, H., & Fleming, M. (1963). Flotation Rate Studies. Em A. Roberts (Ed.), *Proc VI Int. Miner. Proc. Cong.* (pp. 563-579). Pergamon.
- Tomlinson, H., & Fleming, M. (1965). Flotation Rate Studies. Em A. Roberts (Ed.), *Proc VI Int. Miner. Proc. Cong.* (pp. 563-579). Pergamon.
- Trahar, W. (1981). A Rational Interpretation of the Role of Particle Size in Flotation. *Int. Journ. Min. Process*, *8*, pp. 289-327.
- Ueda, T., Oki, T., & Koyanaka, S. (2016). Statistical Effect of Sampling Particle Number on Mineral Liberation Assessment. *Minerals Engineering*, pp. 204-212.
- Ueda, T., Oki, T., & Koyanaka, S. (2018). A General Quantification Method for Addressing Stereological Bias in Mineral Liberation Assessment in Terms of Volume Fraction and Size of Mineral Phase. *Minerals Engineering*, *119*, pp. 156-165.
- Van Deventer, J., Van Dyck, W., Lorenzen, L., & Feng, D. (2002). The dynamic behaviour of coarse particles in flotation froths. Part II: Density tracer tests. *Minerals Engineering*, pp. 647-657.

- Vera, M., Mathe, Z., Franzidis, J., Harris, M., Manlapig, E., & O'Connor, C. (2002). The modelling of froth zone recovery in batch and continuously operated laboratory flotation cells. *Int. J. Miner. Process.*, 64, pp. 135-151.
- Wang, Y., Lin, C., & Miller, J. (2017). Quantitative Analysis of Exposed Grain Surface Area for Multiphase Particles Using X-Ray Microtomography. *Powder Technology*.
- Welsby, S., Vianna, S., & Franzidis, J. (2010). Assigning physical significance to floatability components. *Int. J. Miner. Process.*, 97, pp. 59-67.
- Whiten, B. (2007). Calculation of Mineral Composition from Chemical Analysis. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, pp. 83-97.
- Yanatos, J. (2007). Fluid flow and kinetic modelling in flotation related processes - Columns and mechanically agitated cells - A review. *Trans IChemE*, 85 (A12), pp. 1591-1603.
- Yanatos, J., & Contreras, F. (2010). Particle Entrainment model for industrial flotation cells. *Powder Technology*, 260-267.
- Yianatos, J. (2007). Fluid flow and kinetic modelling in flotation related processes - Columns and mechanically agitated cells - A review. *Trans IChemE*, 85 (A12), pp. 1591-1603.
- Zambrano, G., & Montes-Arena, G. (2012). Errors in the estimation of size-by-liberation flotation rate constants. *Minerals Engineering*, pp. 1-10.
- Zheng, X., Johnson, N., & Franzidis, J. (2006). Modelling of entrainment in industrial flotation cells: Water Recovery and degree of entrainment. *Minerals Engineering*, 19, pp. 1191-1203.

Anexo I - Dedução do Modelo dos Compartimentos

Comparação entre a dedução original e a dedução simplificada

A-I.1 - Introdução

Na revisão bibliográfica da tese, o desenvolvimento do modelo dos compartimentos foi explicado através de uma dedução *simplificada*, obtida a partir da dedução original (Savassi, 2005). Esta dedução simplificada é suportada pelas referências mais usuais da relação entre a zona de coleta e da zona de espuma, bem como por conceitos e relações algébricas mais comuns na literatura de modelamento de flotação.

Esta simplificação:

- representa uma interpretação da dedução original, trazendo-lhe uma nova perspectiva.
- reduz o número de fórmulas necessário para a obtenção do modelo e o tamanho total da dedução, ao tomar balanços e conceitos já consolidados na literatura.
- simplifica o entendimento da origem do modelo, o que facilita o acesso a ele e tende a demonstrar sua robustez de modo mais imediato. Tendo um entendimento mais fácil, o modelo também se torna mais acessível e mais aceito na comunidade científica, não somente para os já familiarizados com o tema, mas também para os novos pesquisadores.

Em todos estes aspectos, permanece o reconhecimento da validade e do enorme valor da dedução original de Savassi e, principalmente, o reconhecimento ao modelo obtido. A obtenção original que detalha todos os fluxos internos à célula de flotação e traça uma lógica voltada para a transferência de massas é muito útil para justificar questões conceituais teóricas detalhadas.

Ambas as deduções – a original de Savassi e a dedução simplificada apresentada por mim nesta tese - são absolutamente equivalentes. De fato, *a dedução simplificada foi totalmente baseada nas observações do próprio artigo original.*

O texto deste anexo visa demonstrar este fato. Para isto, foi feita uma tradução direta do item 2 do artigo original de O.N. Savassi - “A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell.” *Int. J. Miner. Process.*, 2005 - que trata especificamente do desenvolvimento do modelo. Esta tradução foi colocada em paralelo com comentários que explicam a equivalência com a dedução simplificada constante na revisão bibliográfica da tese.

Os comentários explicativos – os que fazem a comparação - estão em azul.

Os textos originais tanto do artigo original como da tese estão em preto.

Estruturalmente, a dedução original é dividida em três partes, cada uma delas detalhada por transferência de massas:

1. Recuperação por arraste
2. Recuperação por flotação real e, por fim,

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

3. Recuperação global para o qual o modelo é definido

A dedução simplificada tem estrutura ligeiramente diferente:

1. inicia-se com a definição geral da recuperação global,
2. segue com a recuperação por flotação real,
3. continua com recuperação por arraste e
4. retoma a recuperação global para definição do modelo.

Assim, os paralelos são realizados *por tema*, tendo como referência de ordenação o artigo original, que é descrito à esquerda. Os comentários são apresentados à direita, em azul. Para evitar confusão com os números das fórmulas matemáticas, a numeração das equações do artigo original é antecedida pela letra A (Eq A 1). As equações utilizadas na descrição da tese são antecedidas pela letra D (D 4.12).

Os dois principais questionamentos levantados em relação à equivalência das duas formas de dedução referem-se:

- ao uso efetivo de somente duas regiões na dedução simplificada, em vez das três regiões da dedução original. Na dedução simplificada, há somente menções à região quiescente como a região sob a espuma. Efetivamente, na simplificação, são utilizadas polpa e espuma, enquanto na dedução original, os fenômenos são descritos em termos da espuma e de uma subdivisão da polpa em zona quiescente e zona de coleta.
- ao uso de um diagrama de fluxo mais geral para a Recuperação por Flotação Real na dedução simplificada, também em função do uso de duas regiões, em vez das três originais. A figura A1 apresenta estas diferenças em diagramas.

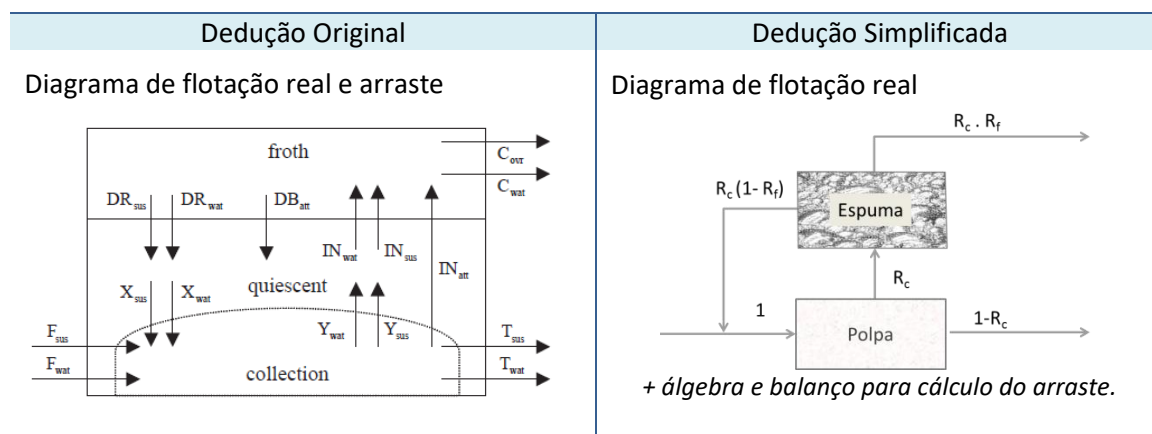


Figura A1 – Comparação entre diagramas e lógica utilizados nas duas deduções

O texto demonstrará que, de fato, as simplificações já estão incluídas nas premissas da dedução original, o que torna as duas formas de explicação equivalentes.

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-I.2 - Demonstração

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell	Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original
2. Desenvolvimento do Modelo 2.1 Recuperação por arraste <i>O arraste de água e partículas suspensas na espuma é causado pela ascensão das bolhas de ar através da interface polpa espuma (Subrahmanyam and Forssberg, 1988; Laplante et al., 1989; Smith and Warren, 1989). Este mecanismo é independente das propriedades da superfície das partículas e assim, afeta tanto partículas hidrofóbicas quanto partículas hidrofílicas suspensas na polpa. (Engelbrecht and Woodburn, 1975; Trahar, 1981).</i> <i>Somente as partículas finas (abaixo de 60 μm) tendem a ser recuperadas por arraste, já que partículas grossas tem taxas de drenagem muito mais altas a partir da espuma. Sendo causado pelas mesmas bolhas que trazem as partículas aderidas para a espuma, o arraste sempre ocorrerá simultaneamente ao mecanismo de flotação real.</i> <i>A motivação desta seção do desenvolvimento do modelo é estabelecer uma expressão para a recuperação de uma classe específica de partículas, exclusivamente por arraste mecânico. A flotação real será abordada posteriormente no artigo.</i> <i>A figura 1 ilustra a transferência de água e partículas suspensas (subscritos “wat” e “sus” respectivamente) em termos dos seguintes fluxos:</i> • <i>F: alimentação;</i> • <i>Y suspensão devido à ação do impelidor que tende a ser da mesma magnitude</i> • <i>IN: fluxo que entra na espuma</i> • <i>DR: drenagem da espuma</i> • <i>X: recirculação por ambos, a ação do impelidor e a sedimentação de partículas</i> • <i>C: concentrado</i> • <i>T: rejeito</i>	

OBS: Como as referências bibliográficas mencionadas no texto da dedução original são específicas do artigo, não há neste anexo o detalhamento destas referências. Para detalhes, ver o artigo original: O.N. Savassi - “A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell.” Int. J. Miner. Process., 2005. As referências citadas na dedução simplificada à esquerda fazem parte da dissertação.

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos

A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell

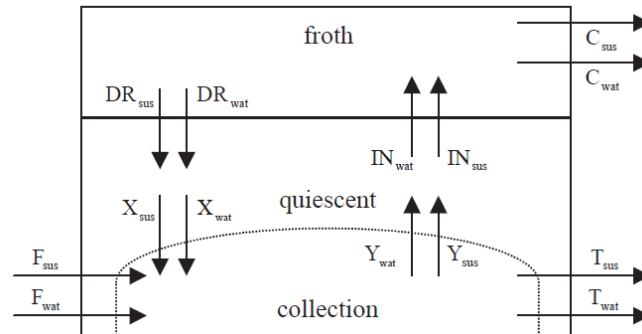


Figura 1 – Transferência de água e partículas suspensas em uma célula convencional

Deve ser enfatizado que o subscrito “sus” quando aplicado à polpa indica partículas suspensas mas o mesmo subscrito quando aplicado à espuma indica partículas que atravessaram a interface polpa espuma por arraste (independentemente de que estas partículas permaneçam ou não suspensas em água em todo o percurso até a calha de concentrado). Como discutido acima, esta abordagem elimina a necessidade de qualquer premissa com respeito à extensão dos subprocessos que ocorrem dentro da região de espuma, simplificando grandemente o modelo. A relação entre a transferência de água e partículas suspensas em uma célula de flotação é frequentemente quantificada pelo grau de arraste, que é definido pela seguinte razão (Johnson, 1972; Trahar, 1981; Subrahmanyam)

$$\text{Arraste mecânico} = \frac{\text{Rec partículas arrastadas para concentrado}}{\text{Rec de água para concentrado}} \quad \text{Eq. A.1}$$

A vantagem de usar o grau de arraste para propósitos de modelamento é que a razão não é fortemente afetada por variações na recuperação de água para um amplo intervalo de condições (Johnson, 1972). O grau de arraste mecânico é frequentemente calculado com base na alimentação isto é, em termos das recuperações da alimentação para o concentrado (Trahar, 1981):

Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original

A figura 1 ao lado divide a célula em três partes, região de coleta, região quiescente e região de espuma e indica o movimento entre estas três áreas. Esta divisão é interessante por detalhar os fluxos e mostrar a dinâmica, mas também poderia ser expressa por somente duas regiões, para efeito do modelo em questão.

Na dedução simplificada, a célula será predominantemente dividida em duas áreas somente, polpa e espuma. A região quiescente é apenas mencionada como a área sob a espuma, apresentando muito mais um caráter descritivo do que efetivo.

Mais adiante, esta divisão em duas partes será mais bem justificada pelas premissas da dedução original

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell	Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original
$ENTFEED = \frac{R_{sus}}{R_{wat}} \quad Eq. A.2$ De um ponto de vista fenomenológico, uma abordagem mais rigorosa é calcular o grau de arraste com base na entrada de partículas suspensas na espuma, isto é em termos das recuperações da polpa para o concentrado. (Johnson, 1972; Bisshop, 1974). O grau de arraste através da espuma é assim definido como (o sobrescrito FR indica a região de espuma) $ENT = \frac{R_{sus}^{FR}}{R_{wat}^{FR}} \quad Eq. A.3$ De acordo com os fluxos representados na figura 1, a recuperação de uma classe de partículas por arraste e a recuperação de água a partir da alimentação para o concentrado são dadas, respectivamente, por: $R_{sus} = \frac{C_{sus}}{F_{sus}} \quad Eq. A.4$ $R_{wat} = \frac{C_{sus}}{F_{wat}} \quad Eq. A.5$ Também de acordo com os fluxos da figura 1, a recuperação na espuma de partículas arrastadas e a recuperação na espuma de água (ambas seguindo da polpa para o concentrado) são dadas por, respectivamente: $R_{sus}^{FR} = \frac{C_{sus}}{IN_{sus}} \quad Eq. A.6$ $R_{wat}^{FR} = \frac{C_{wat}}{IN_{wat}} \quad Eq. A.7$	

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell	Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original
Usando o símbolo ω para representar a concentração de polpa em termos da massa de sólidos por unidade de massa de água, tem-se: $\omega_{sus}^{con} = \frac{C_{sus}}{C_{wat}} \quad \text{Eq. A.8}$ $\omega_{sus}^{feed} = \frac{F_{sus}}{F_{wat}} \quad \text{Eq. A.9}$ $\omega_{sus}^{tail} = \frac{T_{sus}}{T_{wat}} \quad \text{Eq. A.10}$ De acordo com a teoria do enxame de bolhas (Bubble swarm) proposta por Smith e Warren (1989), o mecanismo de arraste mecânico conduz a água e partículas suspensas para a espuma na mesma proporção em que elas existem na zona quiescente (sobrescrito QZ), isto é: $\frac{IN_{sus}}{IN_{wat}} = \omega_{sus}^{QZ} \quad \text{Eq. A.11}$ A combinação das equações A2, A4, A5, A8 e A9 fornece: $ENTFEED = \frac{\omega_{sus}^{con}}{\omega_{sus}^{feed}} \quad \text{Eq. A.12}$ A combinação das equações A3, A4-A6 e A11 fornece: $ENT = \frac{\omega_{sus}^{con}}{\omega_{sus}^{QZ}} \quad \text{Eq. A.13}$	O tema da recuperação de partículas suspensas está no meio da dedução simplificada e se inicia com definição equivalente à equação A13 da original, que também é citada na literatura como definição de arraste mecânico. A equação A13 é algebricamente equivalente à equação A3 de modo direto e, por isto, esta relação não está detalhada no texto da tese que diz: A recuperação de partículas suspensas R_{sus} está diretamente relacionada ao grau de arraste mecânico gerado no processo (ENT) que é quantificada pela seguinte relação (Savassi, 1998): $ENT = \frac{\omega_{sus}^{con}}{\omega_{sus}^{qz}} \quad \begin{matrix} D.4.12 \\ (=A.13) \end{matrix}$ Onde ω_{sus}^{con} = massa de ganga livre (ou partículas suspensas) por massa de água no concentrado e ω_{sus}^{qz} = massa de ganga livre (ou partículas suspensas) por massa de água na região quiescente de polpa

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos

A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell

Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original

Apenas para efeito comparativo entre as considerações algébricas da simplificação e as considerações de transferência de massas do original, esta álgebra é demonstrada a seguir. Considere-se a equação original A13 (que na tese é numerada 4.12):

$$ENT = \frac{\omega_{sus}^{con}}{\omega_{sus}^{qz}} \quad \begin{array}{l} A.13 \\ D.4.12 \end{array}$$

Substituindo as definições já descritas de ω na própria equação, tem-se:

$$ENT = \frac{\text{massa partículas susp}^{con} / \text{massa de água}^{con}}{\text{massa partículas susp}^{qz} / \text{massa de água}^{qz}}$$

Como é a espuma que reside entre a zona quiescente e o concentrado:

$$R_{sus}^{FR} = \frac{\text{massa partículas suspensas}^{con}}{\text{massa partículas suspensas}^{qz}}$$

E

$$R_{wat}^{FR} = \frac{\text{massa de água}^{con}}{\text{massa de água}^{qz}}$$

Então se verifica a equivalência algébrica da Eq A13 com a Eq A3:

$$ENT = \frac{R_{sus}^{FR}}{R_{wat}^{FR}}$$

O texto segue:

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos

A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell

As equações A12 e A13 demonstram que não é necessário determinar o fluxo de partículas suspensas para a espuma de modo a estimar o grau de arraste. Em vez disto, é somente necessário medir a concentração de partículas originalmente suspensas na alimentação, na polpa e no concentrado. Além do mais, a relação entre as duas formas de expressar o arraste é dada pela combinação das equações A12 e A13 da seguinte forma:

$$ENTFEED = \frac{\omega_{sus}^{QZ}}{\omega_{sus}^{feed}} \cdot ENT \quad \text{Eq. A.14}$$

Segundo Johnson(1972), partículas de tamanho e densidade similares exibem taxas de drenagem similares e, portanto, graus de arraste ENT similares através da espuma. Entretanto, a equação 14 demonstra que, se uma classe de partículas hidrofóbicas tem uma baixa concentração na polpa devido à recuperação por flotação real, estas partículas irão ter um grau de arraste menor em relação à alimentação ENTFEED em comparação com uma classe hidrofílica de mesmo tamanho e mesma densidade. Neste sentido, o uso do grau de arraste através da espuma é mais conveniente para propósitos de modelamento, uma vez que este fator não é diretamente afetado pelo mecanismo de flotação real. A combinação das equações A2 e A14 para eliminar ENTFEED fornece:

$$R_{sus} = \frac{\omega_{sus}^{QZ}}{\omega_{sus}^{feed}} \cdot ENT \cdot R_{wat} \quad \text{Eq. A.15}$$

Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original

Para expressar a recuperação de partículas suspensas em função do grau de arraste, novamente, é considerado o balanço de massas, em que, por definição, R_{sus} é dado pela massa de partículas suspensas que reportam ao concentrado, sobre massa de partículas suspensas na alimentação. Seja R_w a recuperação de água. A recuperação R_{sus} pode, então, ser calculada a partir de:

$$R_{sus} = \frac{\omega_{sus}^{QZ}}{\omega_{sus}^{feed}} \cdot ENT \cdot R_{wat} \quad \begin{matrix} \text{D.4.13} \\ = \text{A.15} \end{matrix}$$

Na dedução simplificada, a passagem de A13 para A 15 é direta, porque considera que a álgebra entre os elementos é direta e visa somente transferir a referência para a alimentação. Considerando que:

$$R_{sus} = \frac{\text{massa partículas suspensas}^{con}}{\text{massa partículas suspensas}^{feed}}$$

$$R_{wat} = \frac{\text{massa de água}^{con}}{\text{massa de água}^{feed}}$$

E incluindo as definições de ω como a razão entre massa de partículas e de água para cada região, então:

$$R_{sus} = \frac{\omega_{sus}^{QZ}}{\omega_{sus}^{feed}} \cdot ENT \cdot R_{wat} \quad \begin{matrix} \text{A.15} \\ \text{D.4.13} \end{matrix}$$

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos

A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell

*De modo a usar a equação A15 para propósitos de simulação, é necessário saber do efeito das condições operacionais sobre a concentração de partículas suspensas sob a interface polpa espuma, uma medida que raramente está disponível. Ainda assim, o regime em uma polpa em uma célula convencional pode seguramente ser assumido como sendo de mistura perfeita para água e partículas finas (Johnson, 1972). **De acordo com esta premissa, a concentração de partículas finas suspensas deve ser a mesma em todos os pontos da região de polpa, incluindo a região quiescente e a saída de rejeito, isto é:***

$$\omega_{sus}^{qz} = \omega_{sus}^{tail} \quad \text{Eq. A.16}$$

Onde ω_{sus}^{tail} = massa de ganga livre por massa de água no rejeito. Portanto:

$$R_{sus} = \frac{\omega_{sus}^{tail}}{\omega_{feed}} \cdot ENT \cdot R_w \quad \text{Eq. A.17}$$

Note que as equações A16 e A17 são estritamente válidas apenas para partículas finas, em vista da dificuldade de manter as partículas grossas suspensas longe dos impelidores. Mesmo assim, é pouco provável que a aplicação destas equações a todo o intervalo de partículas provoque qualquer erro apreciável no modelo, uma vez que nem a recuperação por arraste, nem o grau de arraste é relevante para a recuperação de partículas grossas. Neste sentido, ambos os lados da equação 17 tendem a zero para partículas grossas, independentemente de qualquer aspecto de concentração.

Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original

O desenvolvimento desta equação A15 está equivalente nos dois textos. A versão simplificada diz que:

A proporção de massa de ganga livre (*ou partículas suspensas*) por massa de água na região quiescente ω^{qz} é mensurável, mas sua avaliação e associação com condições de processos não é trivial, o que dificulta consideravelmente seu uso para propósitos de simulação. No entanto, em uma célula convencional de flotação, pode-se assumir confiavelmente que o regime é de mistura perfeita para água e partículas finas tanto na região de coleta como na região quiescente. Assim, a composição da polpa é igual à composição do rejeito. Deste modo:

$$\omega_{sus}^{qz} = \omega_{sus}^{tail} \quad \begin{array}{l} \text{A.16} \\ \text{D.4.14} \end{array}$$

É importante notar que, como o regime de mistura é considerado igual tanto na região quiescente como na região de polpa, ***para efeito do modelamento das partículas suspensas, isto reduz a região quiescente e a região de coleta a uma única região, a região de polpa, conforme é dito no próprio texto do artigo original (veja ao lado):*** “De acordo com esta premissa, a concentração de partículas finas suspensas deve ser a mesma em todos os pontos da região de polpa, incluindo a região quiescente e a saída de rejeito.” Esta premissa da dedução original é essencial para que se possa determinar a recuperação de partículas suspensas.

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos

A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell

Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original

Então, a dedução simplificada chega ao mesmo ponto da dedução original:

Para expressar a recuperação de partículas suspensas em função do grau de arraste, novamente, é considerado o balanço de massas, em que, por definição, R_{sus} é dado pela massa de partículas suspensas que reportam ao concentrado, sobre massa de partículas suspensas na alimentação. Seja R_w a recuperação de água. A recuperação R_{sus} pode, então, ser calculada a partir de:

$$R_{sus} = \frac{\omega_{sus}^{tail}}{\omega_{sus}^{feed}} \cdot ENT \cdot R_w \quad \begin{matrix} A.17 \\ D.4.15 \end{matrix}$$

A dedução simplificada segue com o desenvolvimento desta equação:

Considerando as definições das razões ω para o rejeito e alimentação, esta expressão da recuperação de partículas suspensas pode ser relacionada à recuperação global sendo reescrita como:

$$R_{sus} = \frac{1 - R_{ovr}}{1 - R_{wat}} \cdot ENT \cdot R_w \quad \begin{matrix} A.36 \\ D.4.16 \end{matrix}$$

Na dedução original, esta fórmula é obtida de modo idêntico, mas é posicionada quase no fim das demonstrações, como equação A36.

Com isto, a versão simplificada conclui o tema da recuperação de partículas suspensas de modo equivalente à versão original.

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell	Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original
2.2 Recuperação por flotação real <i>Em uma célula convencional, a colisão bolha partícula ocorre mais efetivamente nos vórtices turbulentos gerados pelas pás dos impelidores, onde partículas suspensas, pertencentes a um amplo intervalo de tamanho, podem ser aceleradas em direção a bolhas de ar (Degner, 1985; Fallenius, 1987). Entretanto, mesmo nas vizinhanças do impelidor, partículas de inércia muito baixa, (abaixo de 10 μm) não podem ser facilmente deslocadas das linhas de fluxo da polpa e, assim, tendem a deslizar em torno das bolhas com chances muito baixas de colisão (Dobby and Finch, 1987). Esta é, tipicamente, a razão primária para a queda na flotação real observada para partículas ultrafinas. Se uma partícula colide de modo bem sucedido, ela irá deslizar sobre a superfície da bolha devido ao movimento hidrodinâmico das linhas de fluxo. Então, se a partícula é suficientemente hidrofóbica, uma linha de contato trifásica (sólido-líquido-gasoso) irá se formar ao longo do seu contorno, resultando em adesão (Schulze, 1984). A partícula aderida será empurrada pelas linhas de fluxo até que esteja escondida atrás da bolha (sic), permitindo que diversas outras partículas sejam aderidas da mesma forma. Entretanto, se a adesão não ocorre durante o tempo de deslizamento, a partícula é simplesmente varrida para fora da bolha. Os agregados bolha – partícula que são criados nas vizinhanças do impelidor ascendem para a espuma de onde somente uma fração é efetivamente transportada para a calha de concentrado devido a quebra de bolhas e coalescência de bolhas. (Feteris et al., 1987; Falutsu and Dobby, 1992).</i> <i>A motivação desta seção do desenvolvimento do modelo é estabelecer uma expressão para a recuperação por flotação real, considerando ambos a cinética de coleta na polpa e a eficiência de transporte através da espuma. Isto deve ser feito de modo a permitir que a calibração do modelo a partir dos dados que são prontamente disponíveis na planta.</i>	A dedução simplificada começa pela recuperação global e em seguida inclui a recuperação por flotação real e por arraste. A recuperação por arraste já foi descrita em paralelo com o início da dedução original. Entretanto, para que a recuperação real possa ser adequadamente descrita, é necessário utilizar o texto simplificado desde seu início. Assim, a descrição começa com a recuperação global. Na flotação, a recuperação global, R, é composta pela recuperação de partículas aderidas às bolhas na região de polpa que permanecem aderidas através da camada espuma até reportarem ao concentrado, R_{att}, e pela recuperação de partículas suspensas, R_{sus}, que inclui tanto as partículas originalmente suspensas e arrastadas entre as bolhas como as partículas desprendidas que também são levadas ao concentrado por arraste mecânico. A adesão é o primeiro fenômeno e ocorre quase totalmente na região de coleta, com proporção muito pequena na região quiescente. O arraste é posterior, iniciando na interface entre a região quiescente e a região de espuma e refere-se a partículas suspensas e não aderidas. Tanto a recuperação de partículas suspensas quanto a recuperação de partículas aderidas irão depender das condições na espuma, mas em termos de recuperação global, da alimentação para o concentrado, pode-se afirmar que: $R = R_{att} + (1 - R_{att}) R_{sus} \quad D.4.8$ Que também pode ser expressa por: $R = R_{att}(1 - R_{sus}) + R_{sus} \quad D.4.9$

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos

A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell

A transferência de uma dada classe de partículas por flotação real é ilustrada na Figura 2. O fluxo DB representa o retorno de partículas aderidas vindas da espuma devido a desprendimento seguido de drenagem. Note que o subscrito “att”, quando aplicado à polpa indica partículas aderidas a bolhas, mas o mesmo subscrito, quando aplicado a espuma indica partículas originalmente aderidas a bolhas antes de entrarem na espuma (independentemente de que as partículas permaneçam neste estado todo o caminho até a calha de concentrado)

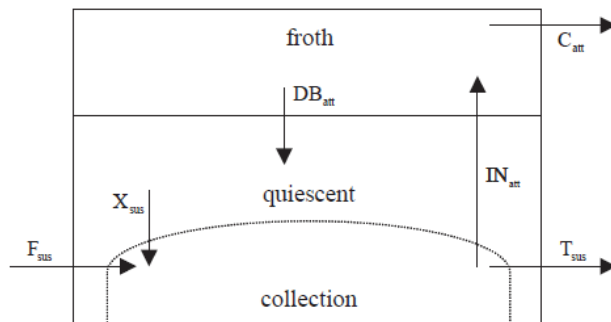


Figura 2– Transferência partículas aderidas na célula

Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original

Então, para considerar separadamente os efeitos de sub-processos na polpa e na espuma é necessário identificar como as duas recuperações são afetadas em cada região. Finch e Dobby (1990) descreveram estas recuperações interligadas em um balanço na célula considerando-se os volumes de polpa e espuma. Seja R_c a recuperação de partículas na região de coleta exclusivamente por adesão e R_f a recuperação destas partículas na região de espuma, reportando ao concentrado. O diagrama da figura 4.2 apresenta a relação entre os fluxos e estas recuperações na polpa e na espuma.

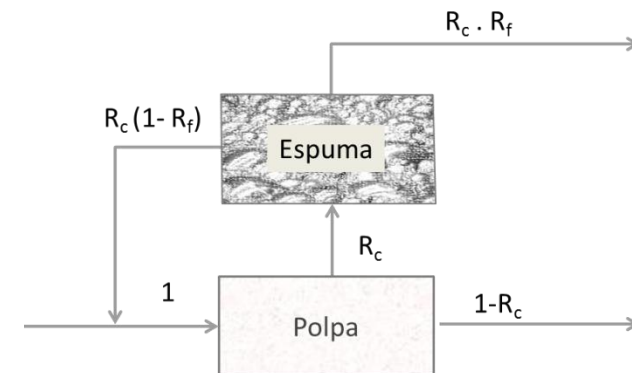


Figura 4.2 – Diagrama de recuperações nas regiões de polpa e espuma (adaptado de Finch and Dobby, 1990)

Este é, sem dúvida, o principal ponto de discussão levantado entre as duas formas de dedução. A adequação do diagrama acima para fins de dedução do modelo foi fortemente questionada. Comentários posteriores demonstrarão sua aplicação como correta. A versão simplificada segue:

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos

A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell

Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original

A partir do balanço, a recuperação de partículas aderidas, R_{att} , pode ser expressa por:

$$R_{att} = \frac{R_C \cdot R_f}{R_C \cdot R_f + 1 - R_C} \quad \text{D. 4.10}$$

E, deste modo, consolidando as equações (4.9) e (4.10), a recuperação global é expressa por:

$$R = \frac{R_C \cdot R_f (1 - R_{sus})}{R_C \cdot R_f + 1 - R_C} + R_{sus} \quad \text{D. 4.11}$$

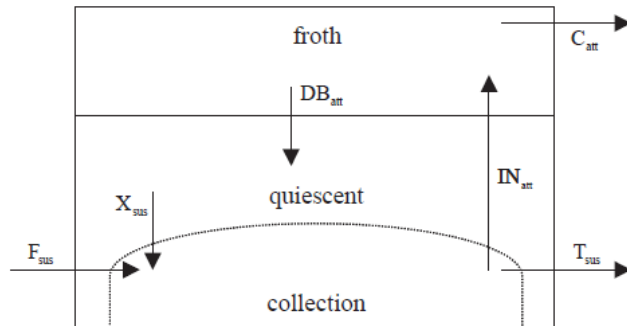
Esta relação é a base para a elaboração da equação do modelo dos compartimentos, que detalha um pouco mais a recuperação de partículas suspensas R_{sus} e a recuperação de partículas aderidas na região de coleta R_c .

Este trecho tratou da relação entre R_c e R_f , que será utilizada para gerar a fórmula final do modelo dos compartimentos. É importante notar que esta equação da versão simplificada 4.11 é idêntica à equação que será obtida quase ao final da versão original como equação A37.

O texto começa a descrever a recuperação na zona de coleta:

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos

A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell



De acordo com a figura 2, a recuperação de uma classe de partículas por flotação real é dada por:

$$R_{att} = \frac{C_{att}}{F_{sus}} \quad \text{Eq. A.18}$$

A recuperação da espuma de partículas aderidas, que é um indicador da massa recuperada na célula é definida por:

$$R_{att}^{FR} = \frac{C_{att}}{IN_{att}} \quad \text{Eq. A.19}$$

A recuperação na zona de coleta é calculada com base na entrada de sólidos totais nesta zona, isto é, as partículas no fluxo de alimentação, bem como aquelas sendo recirculadas a partir da zona quiescente.

Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original

Na definição do modelo dos compartimentos, a região efetiva de coleta é, por premissa, uma região de volume arbitrário e constante nas proximidades do impelidor. Em outras palavras, a zona de coleta está contida na zona de polpa, mas não corresponderia a todo o volume da polpa. Considera-se que, hidrodinamicamente, existe uma região quiescente entre a zona de coleta e a espuma. Nesta zona quiescente, por definição, não ocorreria coleta e a região de coleta efetiva teria um volume fixo em torno do impelidor. Isto faz com que o tempo de residência seja calculado segundo este volume fixo, pré definido e constante entre as células. Seja então

$$R_C^* = \frac{k_C^* \cdot \tau_C^*}{k_C^* \cdot \tau_C^* + 1} \quad \begin{array}{l} \text{D. 4.18} \\ \text{A.27} \end{array}$$

A diferença entre esta relação 4.18 e a equação 4.17 (*fórmula geral de cinética de primeira ordem para regime de mistura*) é que a constante cinética k^* da equação 4.18, por definição, refere-se exclusivamente à adesão bolha partícula na região de coleta pré-definida e parte do princípio que a adesão não ocorre em toda a polpa, somente numa porção dela. Na equação 4.17, todo o volume de polpa corresponderia à zona de coleta. De modo análogo, ambas 4.17 e 4.18 diferem da equação 4.7, em que todo o volume da célula— polpa e espuma — está incluído na definição cinética de k , $\bar{V}$ e R . A vantagem de se usar a equação 4.17 ou 4.18 está em que, por ser exclusiva da região de coleta, k_C aproxima-se mais da realidade da cinética da adesão bolha-partícula e pode ser relacionada a outros parâmetros diretamente ligados a este fenômeno. **O que é importante notar é que a equação da cinética da zona de coleta citada na versão simplificada é equivalente à equação original A 27 e não à A.24.**

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell	Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original
$R_{att}^{CZ} = \frac{IN_{att}}{F_{sus} + X_{sus}} \quad \text{Eq. A.20}$ O tempo de residência médio da polpa na zona de coleta é definido como: $\tau^{CZ} = \frac{\text{volume da zona de coleta}}{\text{fluxo volumétrico total que entra na zona de coleta}} \quad \text{Eq. A.21}$ Dada a densidade de cada classe de partícula suspensa na polpa, q, e o volume da zona de coleta, V_{CZ}, o tempo de residência médio naquela zona pode ser calculado por: $\tau^{CZ} = \frac{V^{CZ}}{\sum \left(\frac{F_{sus} + X_{sus}}{\rho} \right) + F_{wat} + X_{wat}} \quad \text{Eq. A.22}$ Se a aeração nas vizinhanças do impelidor é suficientemente alta para evitar a competição por adesão nas bolhas, a cinética da flotação real pode ser descrita por uma diferencial de primeira ordem do tipo: $\frac{d\omega^{CZ}}{dt} = k^{CZ} \cdot \omega^{CZ} \quad \text{Eq. A.23}$ A constante de flotação k^{CZ}, na equação A 23 é uma função de probabilidades dos fenômenos de colisão bolha partícula, adesão e desprendimento, bem como do fluxo superficial de área de bolhas (Dobby and Finch, 1987). Assumindo regime de mistura perfeita e integrando esta equação, o resultado fornece a recuperação de partículas aderidas: $R_{att}^{CZ} = \frac{k^{CZ} \cdot \tau^{CZ}}{1 + k^{CZ} \cdot \tau^{CZ}} \quad \text{Eq. A.24}$	De fato, todo o desenvolvimento <i>da versão original</i> entre as equações A 18 até A24 refere-se a um processo que ocorre na zona de coleta entre a alimentação e a zona quiescente. Assim, a equação obtida em A24 requer o conhecimento de dados de balanço relativos à zona quiescente, particularmente o conhecimento do fluxo denominado de X_{sus}, e do volume de coleta exato, V_{CZ}, o que é de difícil obtenção, como o próprio artigo mencionará em seguida.

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos

A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell

Lamentavelmente, a falta de informações detalhadas a respeito da hidrodinâmica da polpa na maioria das aplicações impede o uso das equações A20, A22 e A24 para fins de simulação, já que os termos X_{sus} e V_{CZ} não podem ser estimados sem um mapa de vetores de velocidade para cada classe de partículas suspensas na polpa como uma função da velocidade do impelidor. Portanto, outras simplificações são necessárias para desenvolver um modelo que seja dependente somente dos dados normalmente disponíveis na planta. Para esta finalidade, vamos definir uma recuperação aparente de partículas aderidas na zona de coleta em termos do fluxo resultante de partículas suspensas entre a zona de coleta e a zona quiescente como em:

$$*R_{att}^{CZ} = \frac{IN_{att}}{F_{sus} + X_{sus} - Y_{sus}} \quad \text{Eq. A.25}$$

Vamos também definir um tempo de residência médio na zona de coleta, baseado ambos na alimentação e em um valor arbitrário para o volume naquela zona, como em:

$$*\tau^{CZ} = \frac{*V^{CZ}}{\sum \left(\frac{F_{sus}}{\rho} \right) + F_{wat}} \quad \text{Eq. A.26}$$

Finalmente, vamos definir uma constante da taxa de flotação aparente de acordo com:

$$*R_{att}^{CZ} = \frac{*k^{CZ} \cdot *\tau^{CZ}}{1 + *k^{CZ} \cdot *\tau^{CZ}} \quad \text{Eq. A.27}$$

Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original

É neste trecho da dedução original que fica demonstrada a equivalência entre os diagramas e formas de dedução. De fato, a partir do momento em que são feitas estas simplificações, **a região quiescente deixa de ser essencial como uma região separada para a matemática da dedução e a polpa pode a ser entendida por inteiro para a dedução das fórmulas.**

- O tempo de residência na zona de coleta é dado pela alimentação fresca.
- O fluxo de recirculação na zona de coleta, vindo da zona quiescente, é desconsiderado. O que passa a ser de interesse é a resultante do processo. Deste modo, é como se permanecesse somente a zona de coleta e a espuma como elementos principais. A zona quiescente torna-se apenas uma caixa de passagem.

Assim, a equação D4.18 é idêntica à equação A27. Como em relação à recuperação de partículas suspensas, no próprio artigo original, a zona quiescente foi dispensada e deixa de ser essencial à matemática da dedução, este trecho do artigo original demonstra, completamente, a equivalência das duas deduções.

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell	Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original
<i>Obviamente, as simplificações introduzidas acima constituem um artefato matemático, que é necessário para superar a falta de informações detalhadas sobre a hidrodinâmica da polpa. Neste sentido, é essencial investigar o impacto destas simplificações sobre a confiabilidade da predição do modelo. Esta é a motivação para os cálculos apresentados no Apêndice (este é o apêndice do artigo, que não será traduzido, mas pode ser visto na publicação original de Savassi et al), que demonstram que um modelo baseado nas Eqs. A25- 27 tem o mesmo poder preditivo do que as baseadas nas equações A20, A22 e A24 sobre um amplo intervalo de variação nas condições operacionais. Além dos mais, qualquer valor arbitrário pode ser usado para representar o volume da zona de coleta para propósitos de calibração, desde que o valor seja mantido fixo durante a simulação.</i> 2.3 Recuperação Global <i>Há uma forte interconexão entre a flotação real e o arraste em uma célula convencional de flotação: a flotação real reduz a concentração de partículas hidrofóbicas suspensas na polpa e assim reduz as chances de que estas partículas sejam arrastadas na espuma, enquanto a drenagem de água faz com que partículas arrastadas retornem da espuma para outra chance de adesão na região de coleta, dependendo da hidrofobicidade das partículas. A motivação desta seção é assim desenvolver uma expressão para a recuperação global de uma classe de partículas considerando a contribuição da flotação real e dos mecanismos de arraste.</i> <i>A figura 3 ilustra a transferência de massas em uma célula convencional por ambos a flotação real e arraste (o subscrito ovr indica o resultado geral destes dois mecanismos). Note que qualquer partícula individual suspensa na zona quiescente tem três possíveis origens:</i> • <i>rejeição a partir da espuma devido somente à drenagem DR_{sus}</i> • <i>rejeição da espuma devido ao desprendimento seguido de drenagem da água DB_{att}</i> • <i>e suspensão do fundo da célula devido à ação do impelidor, Y_{sus}</i>	

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos

A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell

Mesmo assim, independentemente de suas origens ou hidrofobicidade, qualquer partícula individual suspensa na zona quiescente pode ser ou transferida para a espuma por entrainment IN_{sus} ou para a zona de coleta para uma chance de colisão contra uma bolha de ar, X_{sus} .

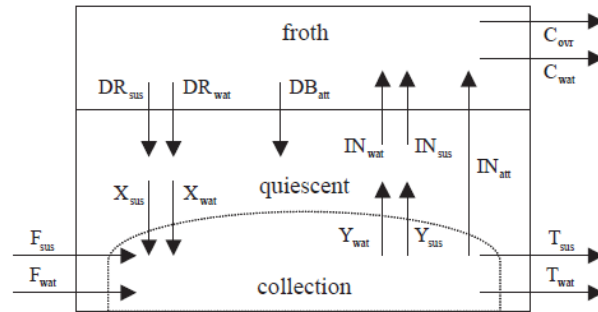


Figura 3 - Transferência de massas em uma célula por flotação real e arraste

De acordo com os fluxos representados na Figura 3, a recuperação global de uma classe de partículas é dada por:

$$R_{ovr} = \frac{C_{ovr}}{F_{sus}} \quad \text{Eq. A.28}$$

O balanço global de massas é expresso por:

$$F_{sus} = C_{ovr} + T_{sus} \quad \text{Eq. A.29}$$

$$F_{wat} = C_{wat} + T_{wat} \quad \text{Eq. A.30}$$

Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell	Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original
<i>O balanço de massas dos sólidos que entram na espuma por arraste ou flotação real é expresso por:</i> $IN_{sus} = C_{sus} + DR_{sus} \quad \text{Eq. A.31}$ $IN_{att} = C_{att} + DB_{att} \quad \text{Eq. A.32}$ <i>O balanço de massas de sólidos ao redor da zona quiescente é expresso por:</i> $Y_{sus} + DR_{sus} + DB_{sus} = X_{sus} + IN_{sus} \quad \text{Eq. A.33}$ <i>O fluxo de sólidos no concentrado consiste de partículas que eram originalmente suspensas na polpa ou originalmente aderidas a uma bolha de ar antes de entrar na espuma, isto é:</i> $C_{ovr} = C_{sus} + C_{att} \quad \text{Eq. A.34}$ <i>Combinando as equações A4, A18, A28, e A34:</i> $R_{ovr} = R_{sus} + R_{att} \quad \text{Eq. A.35}$ <i>A recuperação por arraste tem uma relação adicional com a recuperação global na célula, que é dada pela combinação das equações A5, A9, A10, A17, A28-A30 como em:</i> $R_{sus} = \frac{1 - R_{ovr}}{1 - R_{wat}} \cdot ENT \cdot R_{wat} \quad \text{Eq. A.36}$	A equação A36 é, na versão simplificada, obtida logo depois da descrição da recuperação de partículas suspensas.

Dedução Original do Modelo dos Compartimentos

A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell

A recuperação por flotação real pode ser expressa em termos da recuperação na zona de coleta e da recuperação na espuma de partículas aderidas pela combinação das equações A4, A18, A 19, A 25, A 31-33, como em:

$$R_{att} = \frac{* R_{att}^{CZ} \cdot R_{att}^{FR} \cdot (1 - R_{sus})}{* R_{att}^{CZ} \cdot R_{att}^{FR} + 1 - * R_{att}^{CZ}} \quad \text{Eq. A.37}$$

Note que a equação A37 é similar àquela proposta na literatura para flotação em colunas, assumindo recuperação por arraste insignificante (Shaning Yu, 1985; Finch and Dobby, 1990). Finalmente, a recuperação global de uma classe de partículas em uma célula convencional incluindo a contribuição simultânea da flotação real e arraste é dada pela combinação das equações A27, A35-A37 como em:

$$R_{ovr} = \frac{* k^{CZ} \cdot * \tau^{CZ} \cdot R_{att}^{FR} \cdot (1 - R_{wat}) + ENT \cdot R_{wat}}{(1 + * k^{CZ} \cdot * \tau^{CZ} \cdot R_{att}^{FR}) \cdot (1 - R_{wat}) + ENT \cdot R_{wat}} \quad \text{Eq. A.38}$$

A equação A 38 expressa o modelo dos compartimentos em termos da taxa de flotação constante, o tempo de residência médio na zona de coleta, a recuperação na espuma de partículas aderidas, o grau de arraste através da espuma e a recuperação de água da alimentação para o concentrado. É importante notar que os termos que consideram a flotação real sempre aparecem juntos no produto. Isto simplifica grandemente a calibração do modelo.

Dedução simplificada e comentários sobre sua equivalência à dedução original

Na versão simplificada, esta equação **é obtida diretamente do balanço gerado com o diagrama polpa espuma**, juntamente com a equação equivalente a A 36, o que mais uma vez, demonstra a equivalência das deduções. Veja que a equação D3.13, 3.14 e 3.15 geram exatamente o mesmo resultado O texto termina:

Por fim, incorporando as equações de Rc e Rsus (D 4.16 e D4.17 ou D 4.18) à equação da recuperação global R (D 4.11), tem-se a fórmula geral do modelo dos compartimentos, consolidando as relações de transferência de massas, dada por::

$$R = \frac{k_{CZ} \cdot \tau_{CZ} \cdot R_f \cdot (1 - R_w) + ENT \cdot R_w}{(1 + k_{CZ} \cdot \tau_{CZ} \cdot R_f) \cdot (1 - R_w) + ENT \cdot R_w} \quad \text{D.4.19}$$

Deste modo, **com a equivalência resultante das equações D.4.19 e A 38 demonstra-se a equivalência das deduções.**

Anexo II - Condições Operacionais

Tabela AII 1- Medidas globais das células

Cuba	MPP
<i>dimensões (cm)</i>	
a	19,5
b	10,6
c	15
d	15,4
e	11,4
f	11
g	11
h	9,9

área 1(e*f) (cm ²)	125,4
área 1 útil (e* f - rotor)(cm ²)	109,80
área 2 ((d-f)*e) (cm ²)	50,16

perímetro do rotor (cm)	14
raio rotor (cm)	2,23
área rotor (cm ²)	15,60

Crowder

Trapézio 1

Base menor (cm)	9,7
Base maior (cm)	9,9
altura (cm)	1
área (cm ²)	9,8
volume (cm ³)	111,7

Trapézio 2

Base menor (cm)	1,5
Base maior (cm)	9,9
altura (cm)	11
área (cm ²)	62,7
volume (cm ³)	714,8

volume crowder (cm ³)	826,5

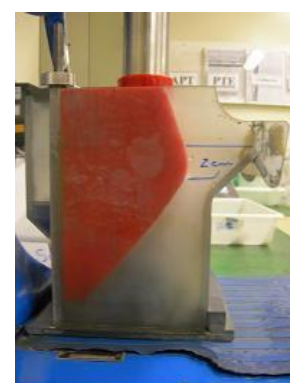
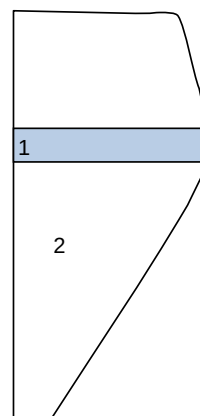
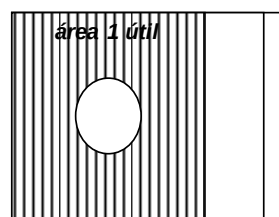
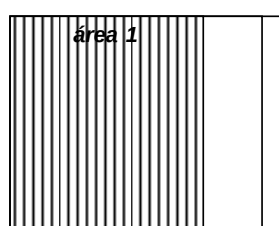
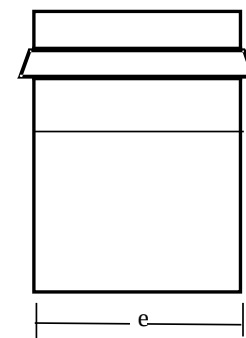
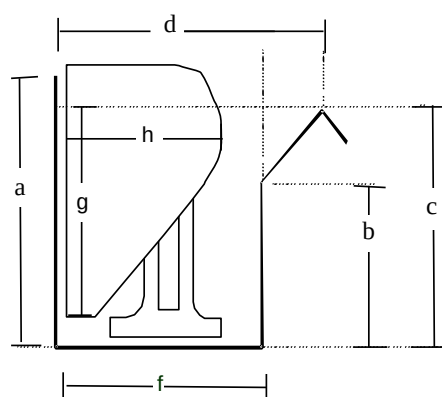
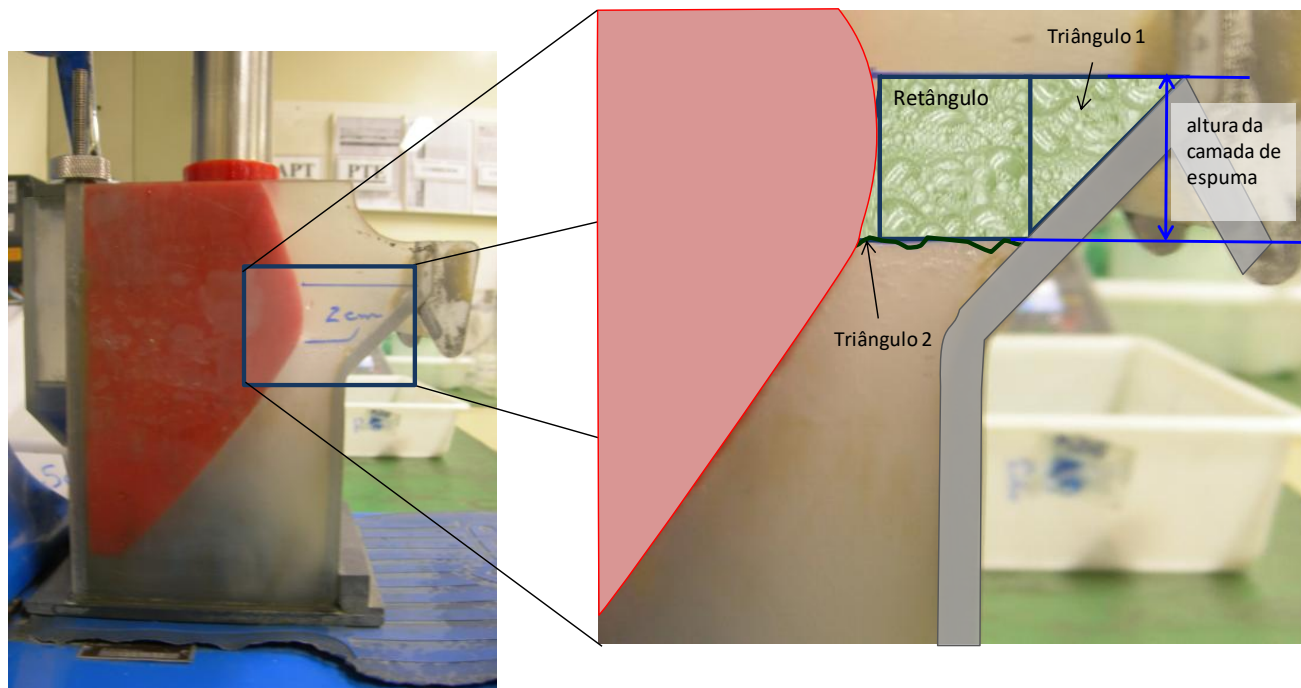


Tabela AII 2 - Medidas das células utilizadas para cálculo do volume da espuma

Teste	Altura de Espuma	Triângulo 1			Retângulo			Triângulo 2			Área Total	Largura	Volume Espuma	Área Seção transversal - Topo	Área Seção transversal - Base	Área Seção transversal - Base Célula (Cz)	Vazão ar injetada sob pressão	Vazão ar ajustada para pressão ambiente
		Base	Altura	Área	Base	Altura	Área	Base	Altura	Área				Área Espuma	Área Espuma	Área Célula (Cz)	lpm	lpm
	cm	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm ²	cm ²	cm	cm ³	cm ²	cm ²	cm ²		
RG1	Cal 1	2	2	2	3,4	2	6,8	0,3	2	0,3	9,1	11,4	103,7	61,56	42,18	109,8	1,03	2,2
	Cal 2	3	3	4,5	2,2	3	6,6	0,6	3	0,9	12	11,4	136,8	61,56	31,92	109,8	0,92	2,0
	Cal 3	4	3,8	7,22	1,5	4	6	1,2	4	2,4	14,82	11,4	168,9	61,56	30,78	109,8	0,92	2,0
Alt max		4	3,8	7,22	1,5	4	6	1,2	4	2,4	14,82	11,4	168,9	61,56	30,78	109,8	0,6	1,3



Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela AII 3 – Determinação do fator de ajuste para calcular a vazão do ar à pressão atmosférica

Pressão de ar indicada na MPP (kg/cm ²)		1,05
Vazão de ar indicada na MPP (L/min)		1,0
Célula	Vazão de ar medida à pressão atmosférica (ml)	Fator de correção
1	2153	2,15
2	2150	2,15
3	2115	2,12
4	2138	2,14
5	2119	2,12
6	2113	2,11
7	2094	2,09
8	2052	2,05
9	2159	2,16
10	2063	2,06
11	2156	2,16
12	2138	2,14
Média		2,12

Anexo III - Balanços de Massas e Metalúrgicos Globais e por Fração Granulométrica

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-III.1 - Introdução aos Anexos de Balanços de Massas

Conforme explicado no item 3.3.2 e 7.2 da tese:

Os dados metalúrgicos são balanceados sequencialmente, de acordo com a hierarquia. Os resultados dos balanços de massa e metalúrgicos globais feitos primeiramente são utilizados como dados de entrada para os balanços por fração granulométrica. Assim, nos balanços por fração, os campos ou células dos programas de balanço que recebem os dados medidos/experimentais dos fluxos globais são preenchidos com os valores já reconciliados dos balanços globais. Os valores de erro permitidos a estes valores são mínimos. Os campos de dados experimentais/medidos dos fluxos granulométricos recebem os valores medidos da granulometria. Deste modo, são bem próximos aos do balanço global. Na sequência, os resultados do balanço granulométrico são usados para restringir o balanço de massas da liberação.

A-III.2 - Balanços de Massas Globais

As tabelas seguintes apresentam os resultados dos balanços de Massas Globais e são equivalentes às tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 da tese.

A-III.2.1 - Ensaio Cal 01- – Balanço Global

Tabela 0.1 – Balanço de massas ensaio **Cal 01** – 2 cm de espuma (Tabela 7.1 tese)

Fluxos	Vazão de sólidos				Vazão de Polpa			Água	Teor de Cobre				Teor de Cpy
	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Recuperação	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Valores Estimados	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Recuperação	Valores Estimados
	M_{gl} (g/min)	M_{gl}^* (g/min)			(g/min)	(g/min)		W_{gl}^* (g/min)	$g_{e, gl}$ (%)	$g_{e, gl}^*$ (%)		(%)	$g_{m, gl}^*$ (%)
Alim	115,0	110,3	4,1%	100,0%	350,7	364,1	3,8%	253,9	2,14	2,12	1,0%	100,0	6,1
Conc Rg 1	11,6	11,3	2,5%	10,3%	54,0	47,3	12,3%	36,0	16,84	17,56	4,3%	85,1	50,7
Rej Rg 1	100,2	98,9	1,2%	89,7%	310,5	316,8	2,0%	217,9	0,4	0,35	12,3%	14,9	1,0
Conc Rg 2	1,3	1,3	2,8%	1,2%	10,8	10,7	0,2%	9,4	15,91	16,58	4,2%	9,6	47,9
Rej Rg 2	101,9	97,6	4,2%	88,5%	332,9	306,1	8,1%	208,5	0,12	0,13	5,8%	5,3	0,4
Conc Sc	4,6	4,6	0,3%	4,1%	65,8	64,8	1,5%	60,3	1,47	1,48	0,4%	2,9	4,3
Rej Sc	91,0	93,0	2,2%	84,4%	244,9	241,3	1,5%	148,3	0,06	0,06	0,9%	2,4	0,2
Conc Cl	10,4	10,8	3,8%	9,8%	38,6	40,5	5,0%	29,7	19,54	19,00	2,7%	87,7	54,9
Rej Cl	1,8	1,9	2,8%	1,7%	16,6	17,5	5,8%	15,7	8,64	8,62	0,2%	7,0	24,9

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

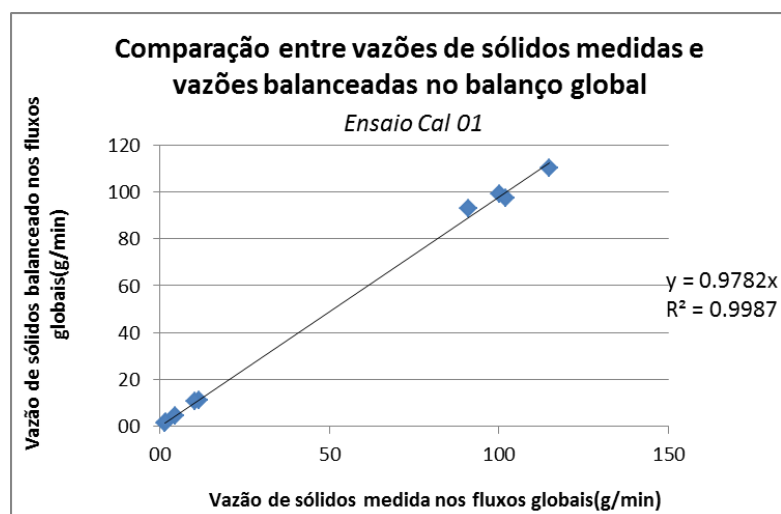


Figura 0.1 – *Ensaio Cal 01* - Comparação entre vazões de sólidos medidas e balanceadas no balanço global

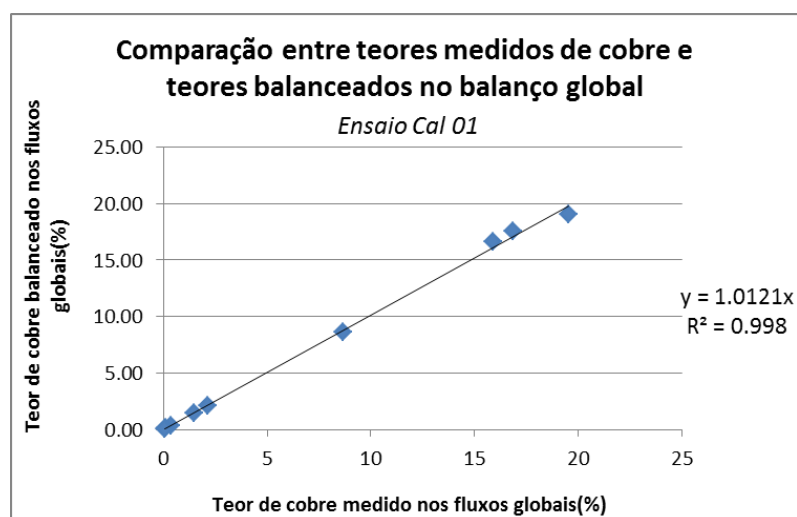


Figura 0.2 – *Ensaio Cal 01* - Comparação entre teores medidos de cobre e teores balanceados no balanço global

A-III.2.2 - Ensaio Cal 02 – Balanço Global

Tabela 0.2 – Balanço de massas ensaio **Cal 02**– 3 cm de espuma (Tabela 7.2 tese)

Fluxos	Vazão de sólidos				Vazão de Polpa			Água	Teor de Cobre				Teor de Cpy
	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Recuperação	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Valores Estimados	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Recuperação	Valores Estimados
	M_{gl} (g/min)	M_{gl}^* (g/min)			(g/min)	(g/min)		W_{gl}^* (g/min)	$g_{e,gl}$ (%)	$g_{e,gl}^*$ (%)		(%)	$g_{m,gl}^*$ (%)
Alim	119,4	118,1	1,1%	100,0%	351,8	366,7	4,3%	248,7	2,12	2,12	0,1%	100,0	6,1
Conc Rg 1	10,1	10,0	1,2%	8,5%	27,8	28,4	2,4%	18,4	20,48	20,55	0,3%	82,0	59,4
Rej Rg 1	115,8	108,1	6,7%	91,5%	352,4	338,3	4,0%	230,2	0,45	0,42	7,5%	18,0	1,2
Conc Rg 2	2,2	2,2	1,2%	1,9%	18,1	18,5	2,4%	16,3	13,68	13,75	0,5%	12,3	39,7
Rej Rg 2	107,2	105,8	1,3%	89,6%	323,2	319,8	1,1%	213,9	0,14	0,13	4,7%	5,7	0,4
Conc Sc	2,1	2,1	1,8%	1,8%	41,6	41,4	0,3%	39,3	3,18	3,20	0,7%	2,7	9,3
Rej Sc	98,8	103,7	5,0%	87,9%	277,2	278,3	0,4%	174,6	0,07	0,07	2,1%	3,0	0,2
Conc Cl	9,1	9,4	3,1%	7,9%	20,5	20,7	0,7%	11,3	21,25	21,61	1,7%	80,8	62,5
Rej Cl	2,9	2,9	0,8%	2,4%	28,5	26,3	7,7%	23,4	11,76	11,79	0,3%	13,6	34,1

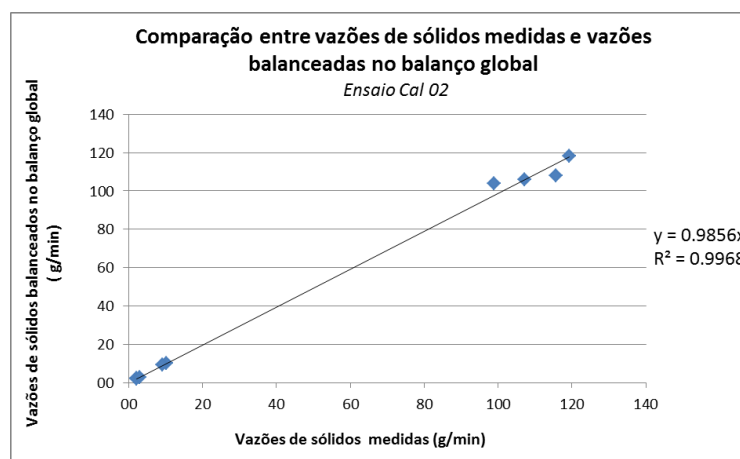
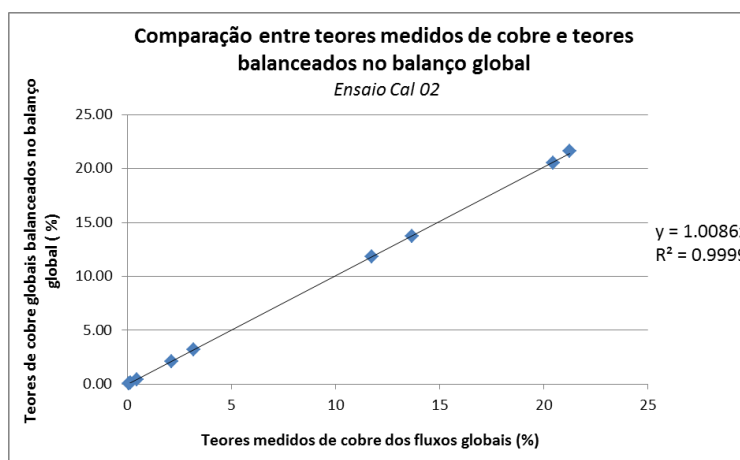


Figura 0.3 – Ensaio Cal 02 - Comparação entre vazões de sólidos medidas e balanceadas no balanço global



Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Figura 0.4 – **Ensaio Cal 02** - Comparação entre teores medidos de cobre e teores balanceados no balanço global

A-III.2.3 - Ensaio Cal 03 - – Balanço Global

Tabela 0.3 – Balanço de massas ensaio Cal 03– 4 cm de espuma (Tabela 7.3 tese)

Fluxos	Vazão de sólidos				Vazão de Polpa			Água	Teor de Cobre				Teor de Cpy
	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Recuperação	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Valores Estimados	Valores Medidos	Valores Estimados	Resíduos	Recuperação	Valores Estimados
	M_{gl} (g/min)	M_{gl}^* (g/min)	$f_{ed} - Est / Med$		(g/min)	(g/min)		W_{gl}^* (g/min)	$g_{e, gl}$ (%)	$g_{e, gl}^*$ (%)		(%)	$g_{m, gl}^*$ (%)
Alim	114,0	111,2	2,4%	100,0%	345,6	358,0	3,6%	246,8	2,12	2,12	0,2%	100,0	6,1
Conc Rg 1	8,5	8,7	2,4%	7,8%	20,9	20,6	1,4%	11,9	21,89	22,06	0,8%	81,6	63,8
Rej Rg 1	104,3	102,5	1,7%	92,2%	339,8	337,4	0,7%	234,9	0,44	0,42	3,9%	18,4	1,2
Conc Rg 2	2,4	2,4	0,1%	2,2%	19,8	19,3	2,3%	16,9	11,89	12,09	1,7%	12,4	34,9
Rej Rg 2	104,2	100,1	3,9%	90,0%	325,6	318,1	2,3%	218,0	0,13	0,14	9,1%	6,0	0,4
Conc Sc	3,0	2,9	1,8%	2,6%	52,5	51,9	1,2%	48,9	2,29	2,27	0,8%	2,8	6,6
Rej Sc	100,9	97,2	3,6%	87,4%	282,6	266,2	5,8%	169,0	0,08	0,08	2,5%	3,2	0,2
Conc Cl	9,3	9,6	3,8%	8,7%	24,3	25,1	3,4%	15,5	21,38	21,27	0,5%	87,0	61,5
Rej Cl	1,4	1,5	3,1%	1,3%	14,1	14,8	5,2%	13,4	11,03	11,03	0,0%	7,0	31,9

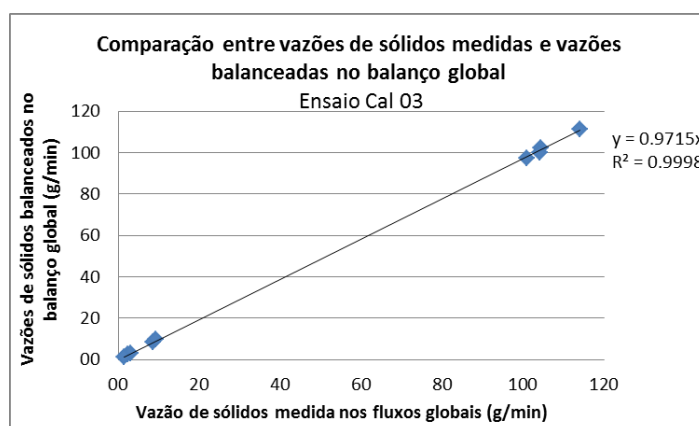


Figura 0.5 – **Ensaio Cal 03** - Comparação entre vazões de sólidos medidas e balanceadas no balanço global

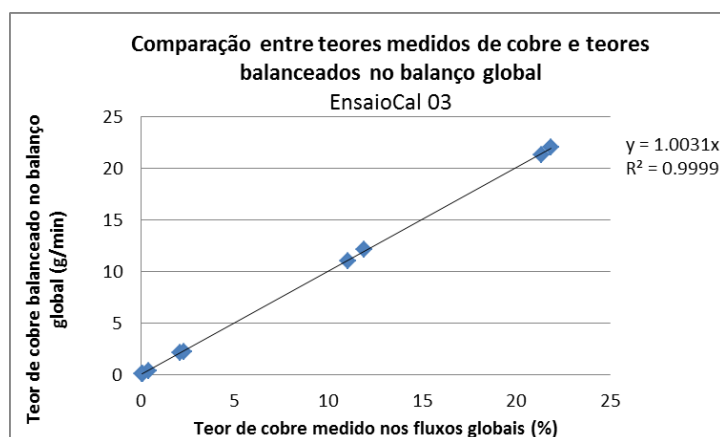


Figura 0.6 – **Ensaio Cal 03** - Comparação entre teores medidos de cobre e teores balanceados no balanço global

A-III.3 - Balanços de Massas por Fração Granulométrica

Para a realização dos balanços por fração granulométrica, foi utilizado o programa Bilco para os ensaios Cal 01 e Cal 03 e o Bilmat para o ensaio Cal 02. O uso de dois programas deveu-se apenas à disponibilidade de uso de cada um deles na época de execução dos balanços. Os resultados do *balanço global* foram utilizados como dados de entrada de vazão global de sólidos, de teor global de calcopirita e de vazão de água de cada fluxo.

Seja considerado o ensaio Cal 03 como exemplo. Para o *concentrado rougher 1*, a vazão de sólidos estimada no primeiro balanço, M_{gl}^* , havia sido igual a 8,7 g/min. O teor de calcopirita estimado, $g_{m,gl}^*$, era igual a 63,8% e a vazão de água W_{gl}^* era igual a 11,92g/min. Estes valores foram utilizados como dados de entrada para o processo no programa Bilco, como dados globais (“bulk”). A eles, haviam sido associados desvios de somente 1 - 2 % porque já representavam dados reconciliados e confiáveis.

Os dados de entrada da distribuição granulométrica correspondiam aos valores amostrados com os respectivos erros estimados de acordo com a qualidade da amostragem.

Deste modo, a reconciliação para este fluxo alterou muito pouco os valores globais, apenas o mínimo necessário para convergência. O processo efetivamente ajustou as frações e os teores por fração para que os resultados finais compostos de granulometria e teores por faixa fossem compatíveis com os dados globais já balanceados. Desta maneira, o nível de erro total foi mantido pequeno, dentro do nível do erro do balanço

Os resíduos foram iguais a 1,4% para a vazão global e 2,4% para o teor de calcopirita. Como a vazão de água não sofre interferência de nenhuma característica do minério, não houve ajuste na vazão de água e o resíduo foi igual a zero.

A-III.3.1 - Ensaio Cal 01- Balanço por fração granulométrica

Tabela 0.4 – ENSAIO CAL 01 – Balanço metalúrgico por fração - Alimentação

Stream #1 Alimentação

Phase: Solids

	Experimental values	Estimated values	Absolute deviation	Relative deviation (%)
Flowrate	110.3 gpm	<u>111.6</u> gpm	1.299	1.171

Size	% Retained	% Retained		
212	11.71 %	12.96 %	1.254	10.16
150	15.33 %	16.43 %	1.1	6.927
74	22.28 %	19.17 %	-3.11	-15.01
44	13.98 %	15.5 %	1.522	10.33
20	21.29 %	20.55 %	-0.7418	-3.546
<u>9</u>	8.2 %	8.263 %	0.06288	0.7639
OF	7.21 %	<u>7.123</u> %	-0.0874	-1.22

Element	Grade	Grade		
Calcopirita	6.1 %	<u>6.092</u> %	-0.008423	-0.1382

Element/Size	Grade	Grade		
Calcopirita/212	3.06 %	2.469 %	-0.5908	-21.37
Calcopirita/150	4.82 %	4.328 %	-0.4924	-10.77
Calcopirita/74	5.41 %	5.666 %	0.2559	4.621
<u>Calcopirita/44</u>	7.87 %	7.346 %	-0.5243	-6.891
Calcopirita/20	9.64 %	<u>9.516</u> %	-0.1239	-1.294
Calcopirita/9	5.12 %	5.776 %	0.6557	12.04
Calcopirita/OF	4.82 %	5.657 %	0.8366	15.97

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.5 – **ENSAIO CAL 01** – Balanço metalúrgico por fração – **Rejeito Rougher 1**

Stream #2 Rej Rougher 1

Phase: Solids

	Experimental values	Estimated values	Absolute deviation	Relative deviation (%)
Flowrate	98.93 gpm	100.3 gpm	1.356	1.361

Size	% Retained	% Retained		
<u>212</u>	16.33 %	13.31 %	-3.018	-20.37
150	16.67 %	<u>16.54</u> %	-0.1302	-0.784
<u>74</u>	21.41 %	19.16 %	-2.249	-11.08
44	15.64 %	<u>15.47</u> %	-0.1709	-1.099
20	17.85 %	20.29 %	2.439	12.79
9	7.29 %	8.338 %	1.048	13.41
OF	4.81 %	6.891 %	2.081	35.57

Element	Grade	Grade		
Calcopirita	1 %	1.032 %	0.03165	3.116

Element/Size	Grade	Grade		
Calcopirita/212	0.4 %	0.4287 %	0.02866	6.918
Calcopirita/150	0.7 %	0.6758 %	-0.02422	-3.521
Calcopirita/74	0.8 %	0.8394 %	0.03937	4.803
Calcopirita/44	0.8 %	0.7739 %	-0.0261	-3.317
Calcopirita/20	1.5 %	1.389 %	-0.1109	-7.68
Calcopirita/9	1.3 %	1.2 %	-0.1003	-8.025
Calcopirita/OF	3.3 %	2.908 %	-0.3917	-12.62

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.6 – ENSAIO CAL 01 – Balanço metalúrgico por fração – Concentrado Rougher 1

Stream #3 Conc Rg 1

Phase: Solids

	Experimental values	Estimated values	Absolute deviation	Relative deviation (%)
Flowrate	11.33 gpm	11.27 gpm	-0.05696	-0.504

Size	% Retained	% Retained		
212	9.08 %	9.868 %	0.7884	8.321
150	14.26 %	15.45 %	1.194	8.036
74	19.89 %	19.25 %	-0.6429	-3.285
44	14.89 %	15.8 %	0.9094	5.926
20	22.83 %	22.85 %	0.02338	0.1023
9	9.63 %	7.595 %	-2.035	-23.63
OF	9.42 %	9.183 %	-0.2368	-2.546

<u>Element</u>	Grade	Grade		
Calcopirita	50.7 %	51.11 %	0.405	0.7957

<u>Element/Size</u>	Grade	Grade		
Calcopirita/212	24.2 %	26.96 %	2.756	10.78
Calcopirita/150	37.3 %	39.1 %	1.797	4.705
Calcopirita/74	50.9 %	48.41 %	-2.488	-5.01
Calcopirita/44	62.7 %	64.59 %	1.887	2.965
Calcopirita/20	73.4 %	73.7 %	0.302	0.4106
Calcopirita/9	59.5 %	50.47 %	-9.031	-16.42
Calcopirita/OF	27.3 %	24 %	-3.297	-12.85

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.7 – **ENSAIO CAL 01** – Balanço metalúrgico por fração – **Concentrado Rougher 2**

Stream #4 Conc Rg 2

Phase: Solids

	Experimental values	Estimated values	Absolute deviation	Relative deviation (%)
Flowrate	1.36 gpm	1.352 gpm	-0.008351	-0.616

Size	% Retained	% Retained		
212	7.36 %	6.623 %	-0.7373	-10.55
150	13.47 %	12.9 %	-0.5687	-4.313
<u>74</u>	21.03 %	19.44 %	-1.593	-7.872
44	11.76 %	<u>11.82</u> %	0.05945	0.5043
20	18.43 %	18.98 %	0.5549	2.966
9	8.68 %	8.964 %	0.2836	3.215
OF	19.27 %	21.27 %	2.001	9.87

Element	Grade	Grade		
Calcopirita	47.9 %	49.54 %	1.636	3.359

Element/Size	Grade	Grade		
<u>Calcopirita/212</u>	21.4 %	20.87 %	-0.5285	-2.501
Calcopirita/150	40.8 %	<u>40.81</u> %	0.005099	0.0125
<u>Calcopirita/74</u>	48.6 %	44.04 %	-4.559	-9.843
Calcopirita/44	58.7 %	<u>58.26</u> %	-0.4431	-0.7578
<u>Calcopirita/20</u>	86.4 %	83.99 %	-2.411	-2.83
Calcopirita/9	56.6 %	<u>56.76</u> %	0.1608	0.2837
Calcopirita/OF	30.9 %	30.14 %	-0.7611	-2.494

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.8 – ENSAIO CAL 01 – Balanço metalúrgico por fração – **Rejeito Rougher 2**

Stream #5 Rejeito Rg 2

Phase: Solids

	Experimental values	Estimated values	Absolute deviation	Relative deviation (%)
Flowrate	97.58 gpm	98.93 gpm	1.354	1.378

Size	% Retained	% Retained		
212	16.28 %	13.4 %	-2.877	-19.38
150	15.53 %	16.59 %	1.06	6.597
74	18.64 %	19.16 %	0.5177	2.739
44	18.34 %	15.52 %	-2.821	-16.66
20	18.2 %	20.31 %	2.107	10.94
9	7.99 %	8.329 %	0.3394	4.16
OF	5.02 %	6.695 %	1.675	28.59

Element	Grade	Grade		
Calcopirita	0.37 %	0.369 %	-0.001023	-0.2769

Element/Size	Grade	Grade		
Calcopirita/212	0.29 %	0.2907 %	0.0006598	0.2272
Calcopirita/150	0.26 %	0.2494 %	-0.01058	-4.154
Calcopirita/74	0.23 %	0.2405 %	0.01053	4.477
Calcopirita/44	0.17 %	0.1758 %	0.005771	3.338
Calcopirita/20	0.35 %	0.334 %	-0.01596	-4.666
Calcopirita/9	0.35 %	0.3828 %	0.03283	8.959
Calcopirita/OF	1.62 %	1.726 %	0.1062	6.35

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.9 – **ENSAIO CAL 01** – Balanço metalúrgico por fração – **Concentrado Scavenger**

Stream #6 Conc Scavenger

Phase: Solids

	Experimental values	Estimated values	Absolute deviation	Relative deviation (%)
Flowrate	4.58 gpm	4.508 gpm	-0.07191	-1.583

Size	% Retained	% Retained		
212	9.06 %	9.318 %	0.2576	2.804
150	3.44 %	3.513 %	0.07339	2.111
74	4.92 %	4.52 %	-0.3999	-8.473
44	3.97 %	3.895 %	-0.07489	-1.904
20	18.21 %	19.24 %	1.034	5.521
<u>9</u>	22.61 %	22.1 %	-0.5094	-2.279
OF	37.8 %	<u>37.41</u> %	-0.3907	-1.039

Element	Grade	Grade		
Calcopirita	4.3 %	4.371 %	0.07084	1.634

Element/Size	Grade	Grade		
Calcopirita/212	2.37 %	2.307 %	-0.06267	-2.68
Calcopirita/150	9.94 %	10.24 %	0.2997	2.97
Calcopirita/74	12.95 %	11.74 %	-1.207	-9.775
Calcopirita/44	7.98 %	7.678 %	-0.3023	-3.861
Calcopirita/20	4.71 %	4.901 %	0.191	3.974
Calcopirita/9	2.34 %	1.997 %	-0.3426	-15.8
Calcopirita/OF	5 %	4.228 %	-0.772	-16.73

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.10 – **ENSAIO CAL 01** – Balanço metalúrgico por fração – **Rejeito Scavenger**

Stream #7 Rej Scavenger

Phase: Solids

	Experimental values	Estimated values	Absolute deviation	Relative deviation (%)
Flowrate	93.02 gpm	94.43 gpm	1.406	1.5

Size	% Retained	% Retained		
212	14.81 %	13.6 %	-1.212	-8.532
150	22.43 %	17.21 %	-5.216	-26.32
74	12.14 %	19.86 %	7.716	48.23
44	18.91 %	16.07 %	-2.836	-16.21
20	18.41 %	20.36 %	1.948	10.05
9	7.75 %	7.672 %	-0.07801	-1.012
OF	5.55 %	5.228 %	-0.3219	-5.973

Element	Grade	Grade		
Calcopirita	0.18 %	0.1779 %	-0.00208	-1.162

Element/Size	Grade	Grade		
Calcopirita/212	0.23 %	0.2247 %	-0.005313	-2.337
Calcopirita/150	0.14 %	0.1521 %	0.01207	8.266
Calcopirita/74	0.12 %	0.1155 %	-0.004475	-3.8
Calcopirita/44	0.09 %	0.08898 %	-0.001019	-1.139
Calcopirita/20	0.12 %	0.1279 %	0.007934	6.4
Calcopirita/9	0.17 %	0.1608 %	-0.009224	-5.577
Calcopirita/OF	0.87 %	0.8716 %	0.001605	0.1844

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.11 – ENSAIO CAL 01 – Balanço metalúrgico por fração – **Concentrado Cleaner**

Stream #10 Conc Cleaner

Phase: Solids

	Experimental values	Estimated values	Absolute deviation	Relative deviation (%)
Flowrate	10.79 gpm	<u>10.75</u> gpm	-0.03836	-0.3561

Size	% Retained	% Retained		
212	9.7 %	10.21 %	0.5061	5.084
150	14.82 %	16.24 %	1.421	9.15
74	18.24 %	20.47 %	2.225	11.5
44	19.72 %	16.88 %	-2.835	-15.49
20	22.53 %	23.06 %	0.5306	2.328
9	6.64 %	5.865 %	-0.7749	-12.39
OF	8.35 %	7.278 %	-1.072	-13.72

<u>Element</u>	Grade	Grade		
Calcopirita	54.9 %	<u>55.26</u> %	0.3602	0.6539

<u>Element/Size</u>	Grade	Grade		
Calcopirita/212	27.17 %	<u>27.13</u> %	-0.0392	-0.1444
<u>Calcopirita/150</u>	37.57 %	40.24 %	2.669	6.861
<u>Calcopirita/74</u>	51.73 %	<u>49.13</u> %	-2.601	-5.157
Calcopirita/44	63.01 %	<u>65.2</u> %	2.186	3.411
<u>Calcopirita/20</u>	87 %	78.91 %	-8.086	-9.748
<u>Calcopirita/9</u>	68 %	<u>69.42</u> %	1.419	2.065
Calcopirita/OF	37.86 %	<u>36.06</u> %	-1.805	-4.883

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.12 – ENSAIO CAL 01 – Balanço metalúrgico por fração – **Rejeito Cleaner**

Stream #11 Rej Cleaner

Phase: Solids

	Experimental values	Estimated values	Absolute deviation	Relative deviation (%)
Flowrate	1.89 gpm	1.873 gpm	-0.01695	-0.901

Size	% Retained	% Retained		
212	5.73 %	5.588 %	-0.1421	-2.51
150	9.38 %	9.094 %	-0.2862	-3.099
74	12.54 %	12.39 %	-0.1466	-1.176
44	6.91 %	6.699 %	-0.2114	-3.106
20	20.18 %	18.87 %	-1.308	-6.697
9	18.93 %	18.51 %	-0.4199	-2.243
OF	26.33 %	28.84 %	2.514	9.112

Element	Grade	Grade		
Calcopirita	24.9 %	26.12 %	1.222	4.789

Element/Size	Grade	Grade		
Calcopirita/212	20.2 %	19.92 %	-0.2783	-1.387
Calcopirita/150	30.1 %	29.14 %	-0.9621	-3.248
Calcopirita/74	39 %	36.66 %	-2.336	-6.174
Calcopirita/44	49.7 %	47.71 %	-1.993	-4.091
Calcopirita/20	50.6 %	44.61 %	-5.985	-12.57
Calcopirita/9	19 %	18.2 %	-0.799	-4.295
Calcopirita/OF	10.2 %	9.812 %	-0.3883	-3.88

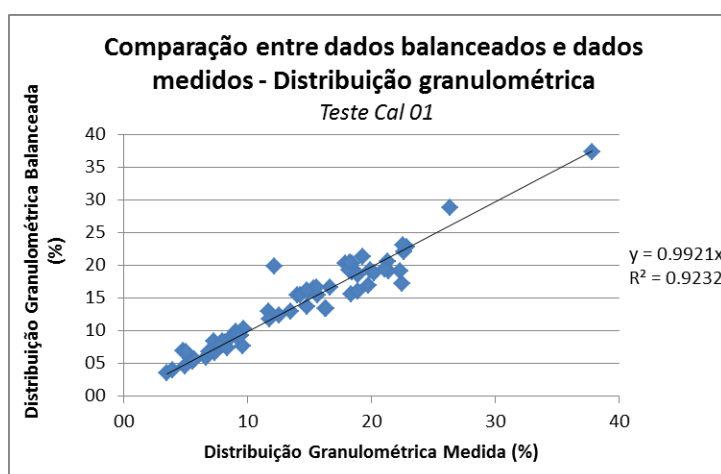


Figura 0.7 – Ensaio Cal 01- Comparação entre dados balanceados e dados medidos de distribuição granulométrica

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

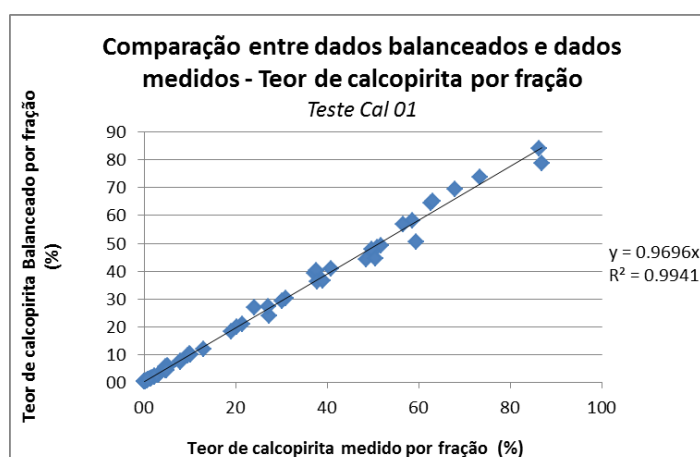


Figura 0.8 – **Ensaio Cal 01**- Comparação entre dados balanceados e dados medidos de teores de calcopirita por fração granulométrica

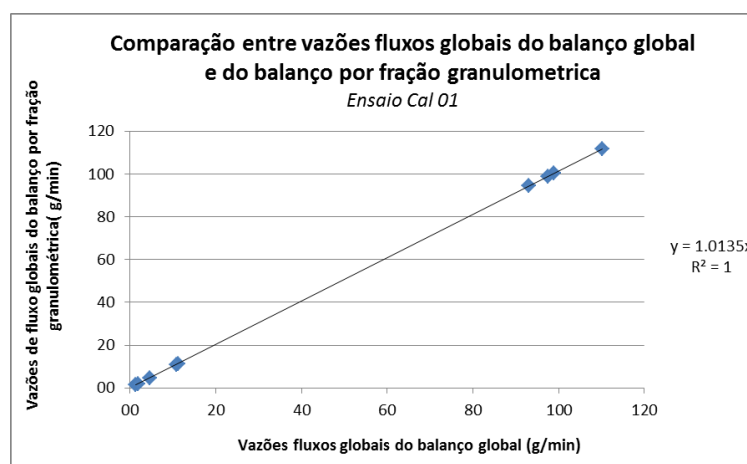


Figura 0.9 – **Ensaio Cal 01** -Comparação entre dados de teores de calcopirita balanceados no balanço global ($g_{m,gl}^*$) e dados de teores rebalanceados no balanço por fração granulométrica ($g_{m,gl}^{**}$)

A-III.3.2 - Ensaio Cal 02 - Balanço por fração granulométrica

Tabela 0.13 – **Ensaio CAL 02** — Dados balanços globais reconciliados novamente no balanço de massas por fração

Stream	Solids Flow Rate				
	Measured Value	Measured Standard Deviation	Adjusted Value	Adjusted Standard Deviation	Residual
	[*] M _{GI} (g/min)	%	^{**} M _{GI} (g/min)	%	(Mea-Adj)
Alimentação	118.06	2%	116.51	0.84%	1.554
Conc Rougher 1	9.98	2%	10.10	1.20%	-0.120
Rej Rougher 1	108.08	2%	106.41	0.89%	1.673
Conc Rougher 2	2.25	2%	2.26	1.72%	-0.016
Rej Rougher 2	105.84	2%	104.15	0.90%	1.691
Conc Scavenger	2.10	2%	2.09	1.88%	0.008
Rej Scavenger	103.74	2%	102.06	0.91%	1.682
Conc Cleaner	9.35	2%	9.37	1.28%	-0.020
Rej Cleaner	2.88	2%	2.99	1.79%	-0.117

Tabela 0.14 – **Ensaio CAL 02** — Dados balanços globais reconciliados novamente no balanço de calcopirita por fração

Stream	Chalcopyrite					
	Measured Value	Measured Standard Deviation	Adjusted Value	Adjusted Standard Deviation	Residual	Recovery
	grade(%)		grade(%)		Mea-Adj	
Alimentação	6.12	1.00%	6.18	0.87%	-0.054	100.00%
Conc Rougher 1	59.39	2.00%	58.44	1.18%	0.954	82.03%
Rej Rougher 1	1.20	2.00%	1.22	1.42%	-0.012	17.97%
Conc Rougher 2	39.73	2.00%	39.35	1.76%	0.372	12.37%
Rej Rougher 2	0.39	2.00%	0.39	1.29%	-0.001	5.60%
Conc Scavenger	9.25	2.00%	9.22	1.87%	0.032	2.68%
Rej Scavenger	0.21	2.00%	0.21	1.84%	0.001	2.92%
Conc Cleaner	62.46	2.00%	61.64	1.23%	0.819	80.25%
Rej Cleaner	34.09	2.00%	34.01	1.99%	0.078	14.15%

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.15 – Ensaio CAL 02 – Balanço metalúrgico por fração para todos os fluxos

Stream	Size	Size				Chalcopyrite			
		Measured Value	Measured Standard Deviation	Adjusted Value	Residual	Measured Value	Measured Standard Deviation	Adjusted Value	Residual
		%retained	%	%retained	(Mea-Adj)	%grade	%	%grade	(Mea-Adj)
Alimentação	212	11.71	12%	13.87	-2.16	3.06	3%	1.91	1.15
	150	15.33	5%	16.61	-1.28	4.82	3%	4.38	0.44
	74	22.28	5%	23.12	-0.84	5.41	5%	6.31	-0.90
	44	13.98	5%	14.00	-0.02	7.87	4%	7.36	0.51
	20	21.29	12%	17.09	4.20	9.64	4%	10.60	-0.96
	OF	15.41	5%	15.31	0.10	5.51	3%	5.76	-0.26
Conc Rougher 1	212	7.36	5%	7.75	-0.39	28.61	3%	28.74	-0.13
	150	18.01	5%	16.83	1.19	41.91	3%	41.57	0.34
	74	24.72	5%	25.48	-0.76	58.67	5%	56.16	2.51
	44	13.18	5%	14.12	-0.94	75.43	3%	72.96	2.47
	20	21.56	5%	21.10	0.46	100.00	15%	82.68	17.32
	OF	15.16	5%	14.72	0.44	69.36	10%	48.63	20.74
Rej Rougher 1	212	14.79	4%	14.46	0.33	0.63	5%	0.54	0.09
	150	17.89	4%	16.59	1.30	0.78	5%	0.80	-0.02
	74	23.31	6%	22.89	0.42	0.98	5%	1.04	-0.06
	44	13.20	6%	13.99	-0.80	1.09	5%	1.08	0.01
	20	16.28	2%	16.71	-0.42	1.81	5%	1.96	-0.14
	OF	14.53	5%	15.36	-0.83	1.98	5%	1.86	0.11
Conc Rougher 2	212	9.63	3%	8.31	1.31	18.18	8%	22.55	-4.38
	150	12.07	5%	11.59	0.48	33.24	4%	35.55	-2.31
	74	17.57	3%	18.85	-1.28	44.22	2%	45.83	-1.61
	44	9.20	5%	9.75	-0.55	56.07	2%	57.69	-1.62
	20	17.72	2%	17.72	0.00	68.79	2%	68.03	0.76
	OF	33.81	2%	33.78	0.04	34.97	5%	20.84	14.13
Rej Rougher 2	212	14.90	4%	14.59	0.31	0.35	5%	0.27	0.08
	150	18.01	4%	16.70	1.31	0.32	5%	0.28	0.04
	74	23.43	7%	22.98	0.45	0.26	5%	0.25	0.01
	44	13.28	9%	14.09	-0.80	0.23	5%	0.22	0.01
	20	16.25	3%	16.69	-0.43	0.52	5%	0.44	0.09
	OF	14.13	5%	14.96	-0.84	1.16	5%	0.93	0.23
Conc Scavenger	212	4.38	5%	4.38	0.00	3.55	5%	3.58	-0.03
	150	3.90	3%	3.90	0.00	19.19	5%	18.52	0.67
	74	5.69	20%	5.66	0.02	27.66	5%	24.55	3.11
	44	3.66	10%	3.66	0.00	24.80	5%	23.36	1.44
	20	16.52	15%	16.14	0.38	14.97	5%	12.85	2.12
	OF	65.86	20%	66.26	-0.40	6.93	5%	6.07	0.85
Rej Scavenger	212	9.62	10%	14.80	-5.18	0.26	5%	0.25	0.01
	150	18.94	7%	16.96	1.98	0.26	5%	0.20	0.06
	74	23.08	7%	23.33	-0.25	0.17	5%	0.13	0.05
	44	12.42	10%	14.30	-1.88	0.12	5%	0.10	0.01
	20	23.19	7%	16.70	6.49	0.26	5%	0.19	0.07
	OF	12.75	7%	13.91	-1.17	0.52	5%	0.43	0.09
Conc Cleaner	212	8.96	5%	8.13	0.82	30.64	2%	28.22	2.41
	150	16.59	5%	17.75	-1.16	43.06	5%	41.18	1.89
	74	25.89	5%	26.43	-0.54	56.94	5%	55.07	1.86
	44	15.92	5%	14.20	1.72	73.99	5%	72.98	1.00
	20	22.99	5%	22.63	0.35	100.00	10%	89.90	10.10
	OF	9.66	5%	10.85	-1.20	86.77	10%	62.39	24.38
Rej Cleaner	212	6.52	7%	6.96	-0.45	25.55	4%	25.04	0.50
	150	9.39	5%	9.98	-0.58	34.68	4%	38.47	-3.79
	74	17.49	5%	17.50	-0.01	44.51	4%	52.87	-8.37
	44	9.82	5%	10.58	-0.76	57.51	4%	62.25	-4.74
	20	13.71	5%	13.76	-0.04	26.47	5%	31.25	-4.78
	OF	43.07	5%	41.22	1.85	7.50	50%	20.08	-12.58

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

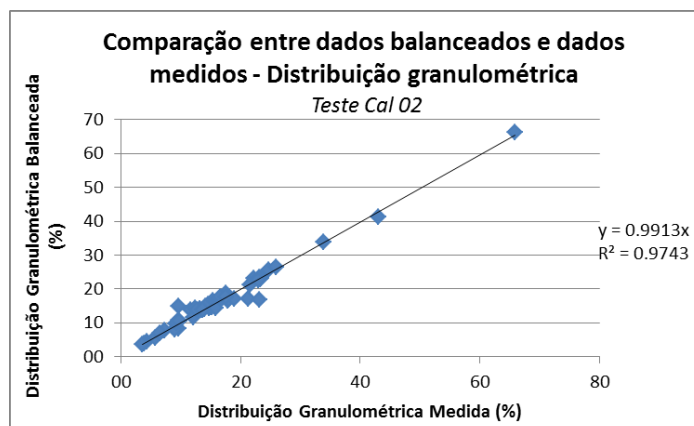


Figura 0.10 – *Ensaio Cal 02* - Comparação entre dados balanceados e dados medidos de distribuição granulométrica

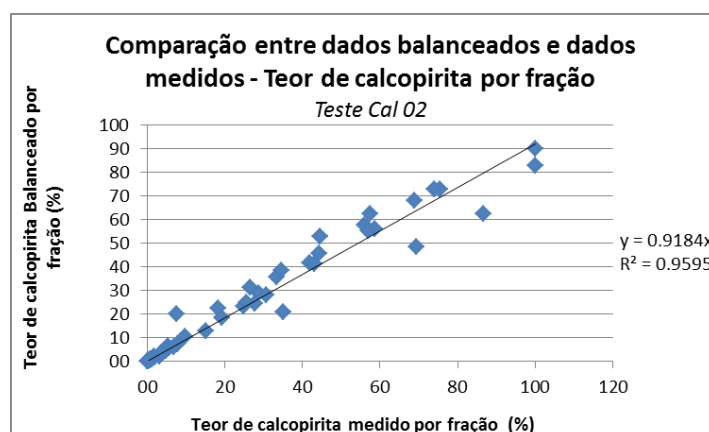
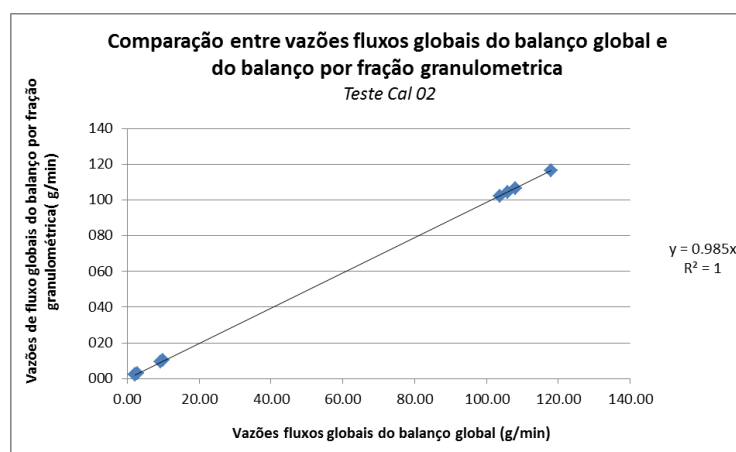


Figura 0.11 – *Ensaio Cal 02*- Comparação entre dados balanceados e dados medidos de teor de calcopirita por fração granulométrica –



Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Figura 0.12 – **Ensaio Cal 02** -Comparação entre dados de vazão balanceados no balanço global (M_{gl}^*) e dados de vazão global rebalanceados no balanço por fração granulométrica (M_{gl}^{**})

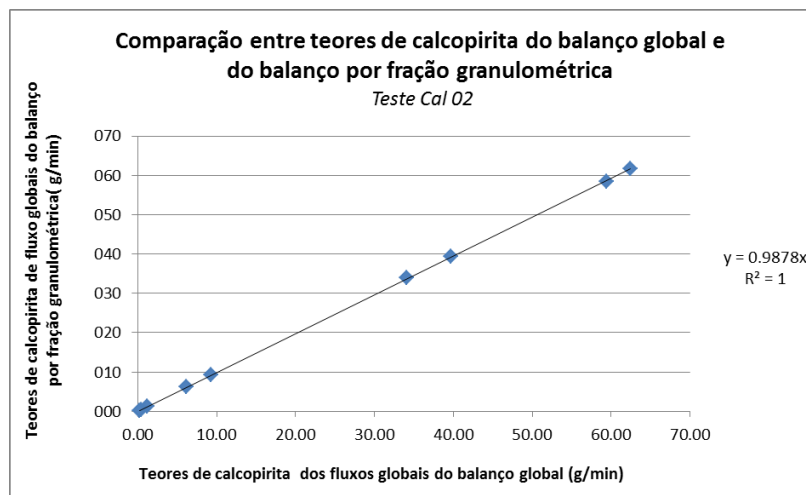


Figura 0.13 – **Ensaio Cal 02** -Comparação entre dados de teores de calcopirita balanceados no balanço global ($g_{m,gl}^*$) e dados de teores rebalanceados no balanço por fração granulométrica ($g_{m,gl}^{**}$)

A-III.3.3 - Ensaio Cal 03 - Balanço por fração granulométrica

Tabela 0.16 – ENSAIO CAL 03 – Balanço metalúrgico por fração – Alimentação

Stream #1 Alimentação

Phase: Solids

	Estimated values	Estimated errors	Experimental values	Experimental errors
Flowrate	112 gpm	± 0.47 %	111.2 gpm	± 1 %

Size	% Retained	Error	% Retained	Error
212	14 %	± 2 %	11.71 %	± 7 %
150	16.3 %	± 1.9 %	15.33 %	± 5 %
74	21.03 %	± 1.6 %	22.28 %	± 5 %
44	15.15 %	± 2.5 %	13.98 %	± 8 %
20	18.05 %	± 1.7 %	21.29 %	± 6 %
9	8.086 %	± 1.2 %	8.2 %	± 3 %
OF	7.393 %	± 1.5 %	7.21 %	± 4 %

Element	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita	6.162 %	± 0.64 %	6.11 %	± 1 %

Element/Size	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita/212	2.283 %	± 3.8 %	3.06 %	± 8 %
Calcopirita/150	4.154 %	± 3.3 %	4.82 %	± 7 %
Calcopirita/74	6.276 %	± 2.9 %	5.41 %	± 6 %
Calcopirita/44	7.207 %	± 3.4 %	7.87 %	± 7 %
Calcopirita/20	10.29 %	± 2.6 %	9.64 %	± 15 %
Calcopirita/9	6.136 %	± 2.5 %	5.12 %	± 7 %
Calcopirita/OF	5.423 %	± 2.3 %	4.82 %	± 5 %

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.17 – **ENSAIO CAL 03** – Balanço metalúrgico por fração – **Concentrado Rougher 1**

Stream #2 Conc Rg 1

Phase: Solids

	Estimated values	Estimated errors	Experimental values	Experimental errors
Flowrate	8.577 gpm	± 0.7 %	8.7 gpm	± 1 %

Size	% Retained	Error	% Retained	Error
212	7.631 %	± 3.7 %	8.07 %	± 5 %
150	14.22 %	± 2.9 %	15.52 %	± 6 %
74	26.21 %	± 2.3 %	25.66 %	± 6 %
44	17.2 %	± 3 %	15.31 %	± 7 %
20	24.37 %	± 2.4 %	24.66 %	± 7 %
9	5.689 %	± 3.5 %	5.97 %	± 7 %
OF	4.69 %	± 4.4 %	4.81 %	± 6 %

Element	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita	65.31 %	± 0.58 %	63.77 %	± 1 %

Element/Size	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita/212	38.48 %	± 4 %	37.86 %	± 9 %
Calcopirita/150	50.98 %	± 3 %	52.03 %	± 9 %
Calcopirita/74	55.24 %	± 2.7 %	66.69 %	± 9 %
Calcopirita/44	73.72 %	± 1.9 %	80.27 %	± 6 %
Calcopirita/20	84.58 %	± 1.4 %	89.58 %	± 2 %
Calcopirita/9	84.83 %	± 1.7 %	89 %	± 2 %
Calcopirita/OF	54 %	± 3.6 %	56.07 %	± 5 %

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.18 – ENSAIO CAL 03 – Balanço metalúrgico por fração – **Rejeito Rougher 1**

Stream #3 Rej Rq 1

Phase: Solids

	Estimated values	Estimated errors	Experimental values	Experimental errors
Flowrate	103.4 gpm	± 0.5 %	102.5 gpm	± 1 %

Size	% Retained	Error	% Retained	Error
212	14.53 %	± 2.1 %	14 %	± 7 %
150	16.47 %	± 2 %	13.9 %	± 12 %
74	20.6 %	± 1.8 %	21.8 %	± 5 %
44	14.98 %	± 2.7 %	15.8 %	± 7 %
20	17.52 %	± 1.9 %	18.8 %	± 5 %
9	8.285 %	± 1.2 %	8.2 %	± 3 %
OF	7.618 %	± 1.5 %	7.5 %	± 3 %

Element	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita	1.256 %	± 1.1 %	1.22 %	± 2 %

Element/Size	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita/212	0.7058 %	± 3.7 %	0.75 %	± 7 %
Calcopirita/150	0.8026 %	± 3.7 %	0.92 %	± 7 %
Calcopirita/74	1.109 %	± 4.5 %	1.3 %	± 7 %
Calcopirita/44	0.872 %	± 4.7 %	0.93 %	± 7 %
Calcopirita/20	1.72 %	± 4 %	2.03 %	± 7 %
Calcopirita/9	1.654 %	± 4.1 %	1.72 %	± 7 %
Calcopirita/OF	2.942 %	± 3.1 %	3.14 %	± 7 %

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.19 – ENSAIO CAL 03 – Balanço metalúrgico por fração – Concentrado Rougher 2

Stream #4 Conc Rg 2

Phase: Solids

	Estimated values	Estimated errors	Experimental values	Experimental errors
Flowrate	2.418 gpm	± 1.5 %	2.41 gpm	± 2 %

Size	% Retained	Error	% Retained	Error
212	11.43 %	± 4.4 %	11.36 %	± 5 %
150	12.48 %	± 4.7 %	11.13 %	± 6 %
74	23.8 %	± 4 %	24.06 %	± 6 %
44	7.86 %	± 6.5 %	9.51 %	± 7 %
20	14.57 %	± 4.8 %	16.28 %	± 7 %
9	10.09 %	± 4.7 %	9.5 %	± 7 %
OF	19.77 %	± 3.5 %	18.16 %	± 6 %

Element	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita	36.3 %	± 0.8 %	34.94 %	± 1 %

Element/Size	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita/212	17.46 %	± 4 %	17.98 %	± 4 %
Calcopirita/150	25.52 %	± 3.9 %	26.59 %	± 4 %
Calcopirita/74	32.61 %	± 3.7 %	37.57 %	± 4 %
Calcopirita/44	47.82 %	± 2 %	48.55 %	± 2 %
Calcopirita/20	69.61 %	± 2 %	73.12 %	± 2 %
Calcopirita/9	44.48 %	± 2.9 %	47.98 %	± 3 %
Calcopirita/OF	25.16 %	± 3.9 %	28.12 %	± 4 %

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.20 – **ENSAIO CAL 03** – Balanço metalúrgico por fração – **Rejeito Rougher 2**

Stream #5 Rejeito Rg 2

Phase: Solids

	Estimated values	Estimated errors	Experimental values	Experimental errors
Flowrate	101.0 gpm	± 0.51 %	100.1 gpm	± 1 %

Size	% Retained	Error	% Retained	Error
212	14.6 %	± 2.1 %	15.85 %	± 3 %
150	16.57 %	± 2.1 %	10.04 %	± 15 %
74	20.53 %	± 1.8 %	23.02 %	± 5 %
44	15.15 %	± 2.8 %	18.62 %	± 7 %
20	17.59 %	± 1.9 %	17.63 %	± 3 %
9	8.242 %	± 1.2 %	7.94 %	± 3 %
OF	7.327 %	± 1.6 %	6.9 %	± 5 %

Element	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita	0.4174 %	± 0.74 %	0.41 %	± 2 %

Element/Size	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita/212	0.3916 %	± 5.1 %	0.49 %	± 8 %
Calcopirita/150	0.3567 %	± 2.8 %	0.38 %	± 5 %
Calcopirita/74	0.2348 %	± 6 %	0.38 %	± 10 %
Calcopirita/44	0.2888 %	± 4.5 %	0.23 %	± 10 %
Calcopirita/20	0.3745 %	± 5.3 %	0.52 %	± 10 %
Calcopirita/9	0.3995 %	± 3.8 %	0.4 %	± 5 %
Calcopirita/OF	1.507 %	± 3.4 %	1.47 %	± 8 %

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.21 – **ENSAIO CAL 03** – Balanço metalúrgico por fração – **Concentrado Scavenger**

Stream #6 Conc Scavenger

Phase: Solids

	Estimated values	Estimated errors	Experimental values	Experimental errors
Flowrate	2.918 gpm	± 0.97 %	2.92 gpm	± 1 %

Size	% Retained	Error	% Retained	Error
212	5.421 %	± 5.7 %	5.25 %	± 6 %
150	3.146 %	± 6.5 %	3.13 %	± 7 %
74	2.537 %	± 3 %	2.53 %	± 3 %
44	6.711 %	± 5.7 %	7.22 %	± 6 %
20	16.46 %	± 4.8 %	16 %	± 6 %
9	22.23 %	± 2.7 %	22.08 %	± 3 %
OF	43.5 %	± 2 %	43.79 %	± 3 %

Element	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita	6.637 %	± 0.92 %	6.57 %	± 1 %

Element/Size	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita/212	4.47 %	± 6 %	4.48 %	± 6 %
Calcopirita/150	17.98 %	± 5.8 %	18.12 %	± 6 %
Calcopirita/74	19.64 %	± 6 %	19.8 %	± 6 %
Calcopirita/44	13.5 %	± 6.2 %	15.87 %	± 6 %
Calcopirita/20	9.124 %	± 5.5 %	9.65 %	± 6 %
Calcopirita/9	3.588 %	± 5.1 %	3.84 %	± 6 %
Calcopirita/OF	4.887 %	± 4.8 %	6.45 %	± 6 %

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.22 – **ENSAIO CAL 03** – Balanço metalúrgico por fração – **Rejeito Scavenger**

Stream #7 Rej Scavenger

Phase: Solids

	Estimated values	Estimated errors	Experimental values	Experimental errors
Flowrate	98.08 gpm	± 0.52 %	97.21 gpm	± 2 %

Size	% Retained	Error	% Retained	Error
212	14.87 %	± 2.2 %	14.67 %	± 6 %
150	16.97 %	± 2.1 %	16.97 %	± 3 %
74	21.06 %	± 1.8 %	20.42 %	± 3 %
44	15.4 %	± 2.8 %	15.53 %	± 7 %
20	17.63 %	± 1.9 %	17.89 %	± 4 %
9	7.826 %	± 1.3 %	7.9 %	± 2 %
OF	6.25 %	± 2 %	6.63 %	± 3 %

Element	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita	0.2324 %	± 0.9 %	0.23 %	± 1 %

Element/Size	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita/212	0.3474 %	± 5.8 %	0.35 %	± 10 %
Calcopirita/150	0.2594 %	± 2.8 %	0.26 %	± 3 %
Calcopirita/74	0.1652 %	± 8.2 %	0.17 %	± 10 %
Calcopirita/44	0.1175 %	± 3 %	0.12 %	± 3 %
Calcopirita/20	0.1314 %	± 9.7 %	0.14 %	± 10 %
Calcopirita/9	0.1301 %	± 9.7 %	0.14 %	± 10 %
Calcopirita/OF	0.8071 %	± 4.9 %	0.9 %	± 5 %

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.23 – ENSAIO CAL 03 – Balanço metalúrgico por fração – **Concentrado Cleaner**

Stream #10 Conc Cleaner

Phase: Solids

	Estimated values	Estimated errors	Experimental values	Experimental errors
Flowrate	9.519 gpm	± 0.64 %	9.62 gpm	± 1 %

Size	% Retained	Error	% Retained	Error
212	8.775 %	± 3 %	8.06 %	± 5 %
150	14.42 %	± 2.5 %	15.86 %	± 3 %
74	27.4 %	± 1.9 %	25.88 %	± 3 %
44	16.36 %	± 2.8 %	15.98 %	± 4 %
20	22.53 %	± 2.2 %	23.46 %	± 3 %
9	5.573 %	± 2.6 %	5.75 %	± 3 %
OF	4.941 %	± 2.7 %	5.01 %	± 3 %

Element	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita	62.89 %	± 0.53 %	61.47 %	± 1 %

Element/Size	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita/212	33.21 %	± 3.5 %	33.53 %	± 4 %
Calcopirita/150	47.69 %	± 2.7 %	49.51 %	± 3 %
Calcopirita/74	51.73 %	± 2.4 %	62.41 %	± 3 %
Calcopirita/44	71.83 %	± 1.8 %	74.02 %	± 2 %
Calcopirita/20	86.13 %	± 1.3 %	87.65 %	± 2 %
Calcopirita/9	86.33 %	± 1.5 %	85 %	± 2 %
Calcopirita/OF	59.86 %	± 2.5 %	62.43 %	± 3 %

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tabela 0.24 – ENSAIO CAL 03 – Balanço metalúrgico por fração – *Rejeito Cleaner*

Stream #11 Rej Cleaner

Phase: Solids

	Estimated values	Estimated errors	Experimental values	Experimental errors
Flowrate	1.477 gpm	± 0.98 %	1.48 gpm	± 1 %

Size	% Retained	Error	% Retained	Error
212	6.485 %	± 4.7 %	6.28 %	± 5 %
150	10.07 %	± 2.9 %	10.09 %	± 3 %
74	14.61 %	± 2.8 %	14.61 %	± 3 %
44	7.28 %	± 4 %	7.52 %	± 4 %
20	20.15 %	± 2.6 %	21.78 %	± 3 %
9	13.64 %	± 2.7 %	13.84 %	± 3 %
OF	27.77 %	± 2 %	25.88 %	± 3 %

Element	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita	33.36 %	± 0.83 %	31.87 %	± 1 %

Element/Size	Grade	Error	Grade	Error
Calcopirita/212	23.82 %	± 4.1 %	24.74 %	± 4 %
Calcopirita/150	29.62 %	± 3.1 %	30.92 %	± 3 %
Calcopirita/74	37.29 %	± 3.1 %	40.75 %	± 3 %
Calcopirita/44	55.27 %	± 3.1 %	58.67 %	± 3 %
Calcopirita/20	55.63 %	± 2.8 %	67.63 %	± 3 %
Calcopirita/9	32.02 %	± 3.1 %	33.82 %	± 3 %
Calcopirita/OF	13.65 %	± 3.1 %	14.51 %	± 3 %

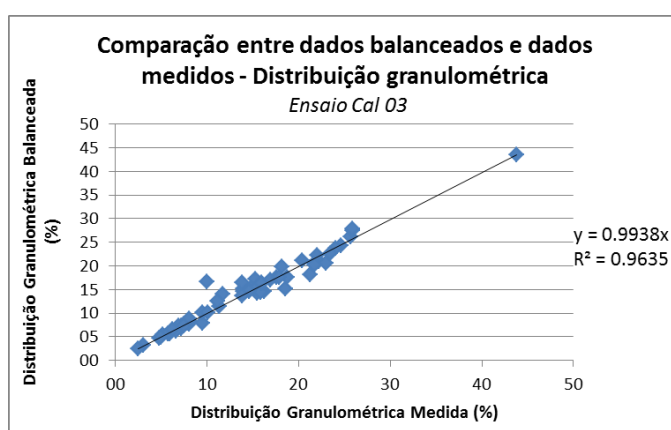


Figura 0.14 – Ensaio Cal 03- Comparação entre dados balanceados e dados medidos de distribuição granulométrica

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

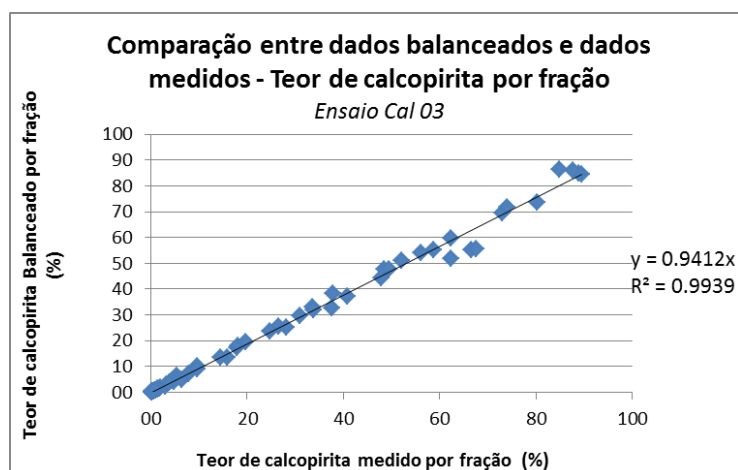


Figura 0.15 – **Ensaio Cal 03**- Comparação entre dados balanceados e dados medidos de teor de calcopirita por fração granulométrica –

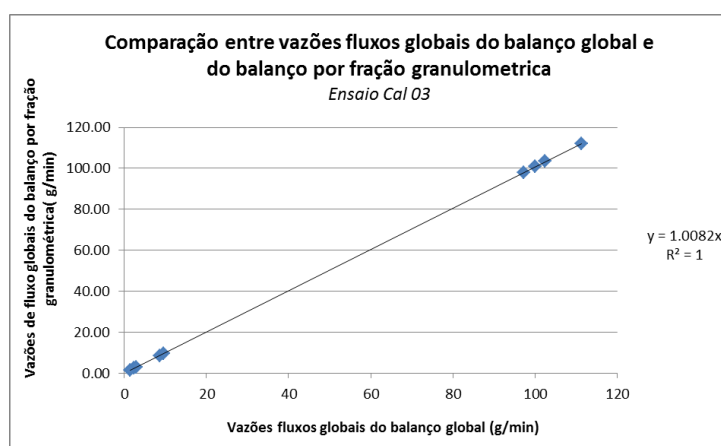


Figura 0.16 – **Ensaio Cal 03** -Comparação entre dados de vazão balanceados no balanço global (M_{gl}^*) e dados de vazão global rebalanceados no balanço por fração granulométrica (M_{gl}^{**})

Anexo IV - Resultados de Análise Mineralógica

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-IV.1 - Ensaio Cal 01

A-IV.1.1 - Dados QEMScan - Cal 01 – Concentrado Rougher 1

Cal 01- Concentrado Rougher 1 - Dados QEMScan											
$j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Teor mássico cpy $\rightarrow$	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%
Teor volumétrico cpy $\rightarrow$	0	0,1- 10%	10- 20%	20- 30%	30- 40%	40- 50%	50- 60%	60- 70%	70- 80%	80- 90%	90- 100%
Tamanho (um) ↓	% Retida										
212	9,87	1,90	12,50	19,94	21,04	19,75	14,35	8,46	1,27	0,79	0,00
150	15,45	2,01	4,67	7,06	11,70	16,36	16,83	14,15	11,71	9,39	2,16
74	19,25	2,93	2,25	4,00	6,88	10,79	10,62	13,02	14,67	15,02	10,11
44	15,80	4,67	1,75	2,36	3,42	5,79	8,65	8,25	10,60	11,47	11,10
20	22,85	7,85	1,30	1,79	2,89	4,64	7,24	6,70	8,24	8,79	8,02
9 + OF (<20)	16,78	57,17	0,35	0,79	1,47	2,02	1,56	2,02	1,55	1,11	1,99
											30,51

A-IV.1.2 - Dados QEMScan - Cal 01 – Rejeito Rougher 2

Cal 01- Rejeito Rougher 2 - Dados QEMScan											
$j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Teor mássico cpy $\rightarrow$	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%
Teor volumétrico cpy $\rightarrow$	0	0,1- 10%	10- 20%	20- 30%	30- 40%	40- 50%	50- 60%	60- 70%	70- 80%	80- 90%	90- 100%
Tamanho (um) ↓	% Retida										
212	13,40	99,34	0,00	0,00	0,12	0,26	0,21	0,00	0,00	0,00	0,07
150	16,59	92,62	6,76	0,17	0,19	0,00	0,10	0,13	0,00	0,00	0,03
74	19,16	96,13	3,46	0,25	0,08	0,06	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
44	15,52	96,83	2,27	0,59	0,26	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	20,31	98,68	0,74	0,25	0,12	0,00	0,15	0,00	0,06	0,00	0,00
9 + OF (<20)	15,02	97,81	0,00	0,46	0,00	0,68	0,00	0,25	0,00	0,00	0,81

A-IV.1.3 - Dados QEMScan - Cal 01 – Concentrado Scavenger

Cal 01- Concentrado Scavenger - Dados QEMScan											
$j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Teor mássico cpy $\rightarrow$	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%
Teor volumétrico cpy $\rightarrow$	0	0,1- 10%	10- 20%	20- 30%	30- 40%	40- 50%	50- 60%	60- 70%	70- 80%	80- 90%	90- 100%
Tamanho (um) ↓	% Retida										
212	9,32	31,00	65,96	2,00	1,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
150	3,51	30,89	37,58	15,83	8,28	4,22	2,00	0,84	0,29	0,07	0,01
74	4,52	38,38	25,14	12,73	11,84	5,04	3,60	1,75	0,72	0,56	0,10
44	3,90	65,19	14,29	7,22	6,26	3,10	2,24	0,99	0,32	0,25	0,10
20	19,24	80,87	4,71	3,55	3,11	1,95	2,35	1,62	0,48	0,50	0,34
9 + OF (<20)	59,51	95,04	0,55	0,35	0,34	0,25	0,15	0,08	0,14	0,08	0,24
											2,77

A-IV.1.4 - Dados QEMScan - Cal 01 – Concentrado Cleaner

Cal 01- Concentrado Cleaner - Dados QEMScan											
$j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Teor mássico cpy $\rightarrow$	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%
Teor volumétrico cpy $\rightarrow$	0	0,1- 10%	10- 20%	20- 30%	30- 40%	40- 50%	50- 60%	60- 70%	70- 80%	80- 90%	90- 100%
Tamanho (um) ↓	% Retida										
212	10,21	1,00	13,10	18,35	20,92	20,11	15,23	8,92	1,53	0,84	0,00
150	16,24	1,04	4,56	7,35	12,28	16,35	16,52	15,06	13,83	7,35	3,80
74	20,47	9,10	7,33	6,42	8,78	10,53	12,84	11,64	11,14	7,53	6,82
44	16,88	5,04	2,87	2,98	3,92	5,83	9,27	8,04	11,24	9,60	10,12
20	23,06	0,69	0,22	0,62	0,90	1,67	2,82	5,14	6,48	9,70	13,19
9 + OF (<20)	13,14	46,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,44	2,56
											50,86

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-IV.1.5 - Dados QEMScan - Cal 01 – Rejeito Cleaner

Cal 01- Rejeito Cleaner - Dados QEMScan											
j →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Teor mássico cpy →	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%
Teor volumétrico cpy →	0	0,1- 10%	10- 20%	20- 30%	30- 40%	40- 50%	50- 60%	60- 70%	70- 80%	80- 90%	90- 100%
Tamanho (um)	% Retida										
212	5,59	4,10	26,35	24,22	16,23	12,02	8,23	4,80	1,97	1,21	0,59
150	9,09	4,40	15,30	14,10	14,73	13,97	11,47	8,68	7,66	4,38	3,30
74	12,39	4,67	5,89	7,96	11,09	13,78	16,29	12,61	10,22	8,34	5,15
44	6,70	2,40	2,61	4,32	6,00	11,24	13,54	14,55	16,44	12,74	9,54
20	18,87	16,75	2,94	4,42	6,49	8,01	9,80	9,91	9,91	11,42	6,01
9 + OF (<20)	47,35	82,53	0,92	0,78	1,07	1,40	0,92	0,96	1,08	0,96	0,39

A-IV.1.6 - Dados QEMScan - Cal 01 – Alimentação – Soma dos fluxos

Cal 01-Alimentação - Soma dos fluxos- Dados QEMScan											
j →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Teor mássico cpy →	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%
Teor volumétrico cpy →	0	0,1- 10%	10- 20%	20- 30%	30- 40%	40- 50%	50- 60%	60- 70%	70- 80%	80- 90%	90- 100%
Tamanho (um)	% Retida										
212	12,96	91,19	1,19	1,57	1,81	1,85	1,41	0,71	0,13	0,07	0,00
150	16,43	83,08	6,63	0,99	1,47	1,69	1,77	1,63	1,39	0,74	0,39
74	19,17	86,19	3,89	0,97	1,09	1,29	1,50	1,35	1,26	0,86	0,76
44	15,50	86,52	2,33	0,87	0,69	0,74	1,07	0,95	1,30	1,10	1,13
20	20,55	86,82	0,72	0,36	0,30	0,30	0,59	0,71	0,91	1,22	1,52
9 + OF (<20)	15,39	91,64	0,09	0,81	0,10	1,22	0,09	0,50	0,12	0,15	0,35

A-IV.2 - Ensaio Cal 02

A-IV.2.1 - Dados QEMScan - Cal 02 – Concentrado Rougher 1

Cal 02- Concentrado Rougher 1 - Dados QEMScan											
j →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Teor mássico cpy →	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%
Teor volumétrico cpy →	0	0,1- 10%	10- 20%	20- 30%	30- 40%	40- 50%	50- 60%	60- 70%	70- 80%	80- 90%	90- 100%
Tamanho (um)	% Retida	Distribuição % em massa									
212	7,75	1,83	6,23	16,54	22,97	15,02	27,35	8,86	1,21	0,00	0,00
150	16,83	2,48	4,01	8,85	11,36	14,98	14,52	18,07	10,93	7,93	3,58
74	25,48	3,11	1,96	4,25	6,78	8,78	11,31	14,86	14,35	12,61	9,17
44	14,12	9,92	2,64	3,96	6,51	5,66	9,17	8,35	10,24	8,55	9,07
20	21,10	2,34	0,35	0,76	1,66	2,60	4,77	7,06	7,51	10,31	12,22
OF	14,72	49,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,47	1,75	4,57

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-IV.2.2 - Dados QEMScan - Cal 02 – Rejeito Rougher 2

Cal 02- Rejeito Rougher 2 - Dados QEMScan												
$j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Teor mássico cpy $\rightarrow$	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%	
Teor volumétrico cpy	0	0,1- 10%	10- 20%	20- 30%	30- 40%	40- 50%	50- 60%	60- 70%	70- 80%	80- 90%	90- 100%	
Tamanho (μm)	% Retida	Distribuição % em massa										
212	14,59	94,77	5,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
150	16,70	92,20	7,26	0,50	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
74	22,98	95,26	4,17	0,22	0,30	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
44	14,09	97,56	2,09	0,15	0,10	0,04	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	16,69	98,55	0,39	0,49	0,14	0,10	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00	0,08
OF	14,96	98,01	0,00	0,62	0,00	0,31	0,51	0,00	0,00	0,00	0,35	0,21

A-IV.2.3 - Dados QEMScan - Cal 02– Concentrado Scavenger

Cal 02- Concentrado Scavenger - Dados QEMScan												
$j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Teor mássico cpy $\rightarrow$	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%	
Teor volumétrico cpy	0	0,1- 10%	10- 20%	20- 30%	30- 40%	40- 50%	50- 60%	60- 70%	70- 80%	80- 90%	90- 100%	
Tamanho (μm)	% Retida	Distribuição % em massa										
212	4,38	11,42	42,22	28,15	12,77	4,61	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
150	3,90	15,48	20,85	15,67	14,30	12,04	8,23	5,88	4,25	1,75	1,00	0,56
74	5,66	11,75	14,23	12,71	13,63	13,91	12,76	7,76	6,34	3,08	1,81	2,01
44	3,66	26,26	8,93	8,03	10,03	10,55	10,85	7,57	6,55	3,86	3,12	4,25
20	16,14	54,86	7,71	5,71	6,79	6,27	5,34	4,08	3,11	2,35	1,30	2,48
OF	66,26	81,46	4,17	3,40	2,98	2,59	1,54	0,93	0,89	0,57	0,52	0,96

A-IV.2.4 - Dados QEMScan - Cal 02 – Concentrado Cleaner

Cal 02- Concentrado Cleaner - Dados QEMScan												
$j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Teor mássico cpy $\rightarrow$	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%	
Teor volumétrico cpy	0	0,1- 10%	10- 20%	20- 30%	30- 40%	40- 50%	50- 60%	60- 70%	70- 80%	80- 90%	90- 100%	
Tamanho (μm)	% Retida	Distribuição % em massa										
212	8,13											
150	17,75	Amostra inválida										
74	26,43	Amostra inválida										
44	14,20	2,52	0,95	1,63	2,38	4,20	7,26	6,62	9,45	11,59	13,41	39,99
20	22,63	0,70	0,19	0,56	1,11	2,13	2,61	3,90	6,03	9,79	14,25	58,74
OF	10,85											

A-IV.2.5 - Dados QEMScan - Cal 02 – Rejeito Cleaner

Cal 02- Concentrado Cleaner - Dados QEMScan												
$j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Teor mássico cpy $\rightarrow$	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%	
Teor volumétrico cpy	0	0,1- 10%	10- 20%	20- 30%	30- 40%	40- 50%	50- 60%	60- 70%	70- 80%	80- 90%	90- 100%	
Tamanho (μm)	% Retida	Distribuição % em massa										
212	6,96											
150	9,98	Amostra inválida										
74	17,50	Amostra inválida										
44	10,58	9,79	2,56	3,28	6,58	7,84	10,26	8,96	11,83	7,91	7,88	23,11
20	13,76	52,96	4,82	7,08	6,42	8,22	6,29	3,96	2,85	3,16	1,70	2,54
OF	41,22											

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-IV.3 - Ensaio Cal 03

A-IV.3.1 - Dados QEMScan - Cal 03 – Concentrado Rougher 1

Cal 03- Concentrado Rougher 1 - Dados QEMScan													
			Classes de liberação, j										
i	Tamanho partícula (mm)	% Retida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			Classes de liberação, de acordo com o teor volumétrico de calcopirita indicado pelo QEMScan										
			0	0,1 -10%	10-20%	20- 30%	30 - 40%	40 - 50%	50 - 60%	60 -70%	70 - 80%	80 - 90%	90-100%
			Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação por fração granulométrica (%)										
1	212	7,6	0,32	7,44	13,2	21,4	27,9	18,1	11,6	0,0	0,0	0,0	0,0
2	150	14,2	1,00	3,16	6,57	10,2	16,6	15,5	16,5	13,7	8,8	4,9	3,2
3	74	26,2	0,94	1,26	2,54	3,92	7,19	11,8	16,7	16,7	15,5	12,3	11,2
4	44	17,2	2,1	0,6	1,4	2,0	3,1	4,9	7,6	7,9	12,1	13,8	44,5
5	20	24,4	3,9	0,6	0,5	2,3	0,6	1,8	2,6	3,2	2,9	4,7	76,8
6	9	10,4	29,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	70,8

A-IV.3.2 - Dados QEMScan - Cal 03 – Rejeito Scavenger

Cal 03- Rejeito Scavenger - Dados QEMScan													
			Classes de liberação, j										
i	Tamanho partícula (mm)	% Retida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			Classes de liberação, de acordo com o teor volumétrico de calcopirita indicado pelo QEMScan										
			0	0,1 -10%	10-20%	20- 30%	30 - 40%	40 - 50%	50 - 60%	60 -70%	70 - 80%	80 - 90%	90-100%
			Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação por fração granulométrica (%)										
1	212	14,9	95,04	4,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	150	17,0	93,71	6,19	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	74	21,1	96,80	2,97	0,19	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	44	15,4	97,99	1,64	0,34	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	20	17,6	98,79	0,46	0,46	0,00	0,14	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
6	9	14,1	99,06	0,00	0,09	0,05	0,18	0,00	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00

A-IV.3.3 - Dados QEMScan - Cal 03– Concentrado Scavenger

Cal 03- Concentrado Scavenger - Dados QEMScan													
			Classes de liberação, j										
i	Tamanho partícula (mm)	% Retida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			Classes de liberação, de acordo com o teor volumétrico de calcopirita indicado pelo QEMScan										
			0	0,1 -10%	10-20%	20- 30%	30 - 40%	40 - 50%	50 - 60%	60 -70%	70 - 80%	80 - 90%	90-100%
			Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação por fração granulométrica (%)										
1	212	5,4	4,07	77,25	12,99	3,79	1,24	0,46	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
2	150	3,1	8,46	30,33	27,02	17,64	10,01	3,97	1,74	0,66	0,06	0,08	0,03
3	74	2,5	16,38	20,62	16,27	14,82	11,74	8,89	5,22	3,56	1,40	0,57	0,52
4	44	6,7	27,08	16,42	12,89	9,48	10,11	7,94	5,32	4,79	2,78	1,36	1,84
5	20	16,5	70,48	4,51	4,88	5,65	3,45	2,72	3,04	1,65	1,28	0,87	1,46
6	OF	43,5	91,67	0,18	0,78	1,22	1,21	0,92	0,55	1,14	0,40	0,52	1,40

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-IV.3.4 - Dados QEMScan - Cal 03 – Concentrado Cleaner

Cal 03- Concentrado Cleaner - Dados QEMScan			Classes de liberação, j										
i	Tamanho partícula (mm)	% Retida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			Classes de liberação, de acordo com o teor volumétrico de calcopirita indicado pelo QEMScan										
			0	0,1 -10%	10-20%	20- 30%	30 - 40%	40 - 50%	50 - 60%	60 -70%	70 - 80%	80 - 90%	90-100%
			Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação por fração granulométrica (%)										
1	212	8,8	0,00	4,99	9,47	15,5	24,0	24,5	17,9	3,61	0,00	0,00	0,00
2	150	14,4	0,88	2,63	4,67	7,40	14,1	18,5	15,6	15,8	12,3	5,76	2,43
3	74	27,4	0,86	1,15	2,12	3,93	8,23	10,6	13,7	17,6	16,5	11,5	13,9
4	44	16,4	1,84	0,77	1,72	3,00	4,08	5,02	9,01	10,1	12,1	14,4	37,9
5	20	22,5	0,96	0,24	0,40	1,05	1,54	1,94	4,05	5,58	7,33	11,64	65,2
6	OF	10,5	24.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.75	5.21	68.9

A-IV.3.5 - Dados QEMScan - Cal 03 – Rejeito Cleaner

Cal 03- Rejeito Cleaner - Dados QEMScan													
			Classes de liberação, j										
i	Tamanho partícula (mm)	% Retida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			Classes de liberação, de acordo com o teor volumétrico de calcopirita indicado pelo QEMScan										
			0	0,1 -10%	10-20%	20- 30%	30 - 40%	40 - 50%	50 - 60%	60 -70%	70 - 80%	80 - 90%	90-100%
			Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação por fração granulométrica (%)										
1	212	6,5	0,2	24,5	23,7	23,7	14,0	13,3	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
2	150	10,1	4,8	11,2	13,5	16,0	15,2	15,5	10,7	7,3	3,5	1,5	0,8
3	74	14,6	4,4	6,3	8,9	10,1	14,4	15,2	11,7	12,0	7,7	5,3	3,9
4	44	7,3	6,1	2,0	3,3	4,4	5,7	10,0	10,3	11,7	12,3	9,8	24,4
5	20	20,2	4,6	1,2	2,4	4,7	6,1	7,8	9,3	12,8	12,5	13,2	25,4
6	9	41,4	74,7	0,0	0,1	0,6	1,1	1,3	2,2	2,9	3,6	3,7	9,7

A-IV.3.6 - Dados QEMScan - Cal 03 – Alimentação – Soma dos fluxos

Cal 03-Alimentação			Soma dos Produtos - Dados QEMScan										
i	Tamanho partícula (mm)	% Retida	Classes de liberação, j										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			Classes de liberação, de acordo com o teor volumétrico de calcopirita indicado pelo QEMScan										
			0	0,1 -10%	10-20%	20- 30%	30 - 40%	40 - 50%	50 - 60%	60 -70%	70 - 80%	80 - 90%	90-100%
Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação por fração granulométrica (%)													
1	212	14,0	88,44	5,81	0,78	1,01	1,38	1,39	0,96	0,19	0,00	0,00	0,00
2	150	16,3	85,59	6,09	0,66	0,80	1,23	1,54	1,27	1,25	0,95	0,45	0,19
3	74	21,0	85,08	2,86	0,53	0,57	1,11	1,34	1,64	2,07	1,90	1,32	1,57
4	44	15,2	87,75	1,73	0,63	0,41	0,56	0,62	0,95	1,06	1,22	1,40	3,66
5	20	18,1	86,34	0,55	0,59	0,32	0,45	0,39	0,64	0,95	0,99	1,45	7,33
6	-20	15,5	89,66	0,01	0,14	0,15	0,27	0,11	0,62	0,21	0,20	0,47	4,42

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Anexo V - Resultados de Ajuste Beta

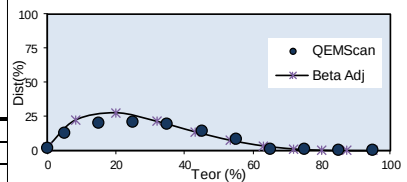
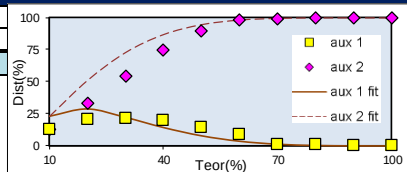
Os resultados de ajuste beta são apresentados em duas partes. Na primeira parte foram colocadas as planilhas de cálculo beta para cada fluxo contendo todos os detalhes do processo de obtenção da curva beta. Na segunda parte há planilhas consolidadas apenas com os resultados do ajuste beta para os fluxos.

A-V.1 - Ensaio Cal 01 – Planilhas Individuais de Cálculo Beta

A-V.1.1 - Cal 01 - Concentrado Rougher 1 - Fração +212 μm

Ensaio Cal 01		Conc Rg1		Fração +212 µm					
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _{m mista,j}	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _{m mista,j}	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m	Dist auxiliar simples calculada beta- f _{m mista}	Dist simples calculada beta- f _{m beta,j}	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
						mista beta,j	beta,j		
1	0	1,9	0,0	-	-	-	-	2,4	0,00
2	0-10	12,5	5,0	12,74	12,74	22,64	22,64	22,1	5,8
3	10-20	19,9	15,0	20,33	33,07	50,92	28,28	27,6	14,9
4	20-30	21,0	25,0	21,45	54,52	72,83	21,90	21,4	24,7
5	30-40	19,8	35,0	20,13	74,65	86,94	14,11	13,8	34,6
6	40-50	14,4	45,0	14,63	89,28	94,71	7,78	7,6	44,4
7	50-60	8,5	55,0	8,62	97,90	98,31	3,60	3,5	54,3
8	60-70	1,3	65,2	1,29	99,19	99,62	1,31	1,3	64,0
9	70-80	0,8	75,0	0,81	100,00	99,96	0,33	0,3	73,7
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,04	0,0	82,9
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	93,0
			100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	28,3	0,3			0,2	100,00	21,8
				0,1					
							Gama	23,96	

Ajuste com a curva beta					
a	1,57	aini	2,05	Dens cpy	4,30
b	5,47	bini	5,05	Dens amostra	3,3
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	12,74	22,64	98,02	92,34
3	10-20	33,07	50,92	318,79	58,90
4	20-30	54,52	72,83	335,32	0,12
5	30-40	74,65	86,94	150,96	35,70
6	40-50	89,28	94,71	29,57	45,63
7	50-60	97,90	98,31	0,17	24,47
8	60-70	99,19	99,62	0,18	0,00
9	70-80	100,00	99,96	0,00	0,22
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		130,24	S2 S1 =	93,30	25,74
$\zeta =$		25	ζ S3 =		9,13
$\eta =$		10	η S4 =	2,07	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- $f_{m\text{mista},j}$	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	1,9	0,0	0,0	3,0	2,4	0,0
2	5,0	3,1	12,5	7,0	5,8	3,1	22,1	8,1
3	15,0	3,2	19,9	20,2	14,9	3,2	27,6	20,0
4	25,0	3,3	21,0	32,3	24,7	3,3	21,4	31,9
5	35,0	3,5	19,8	43,5	34,6	3,5	13,8	43,1
6	45,0	3,6	14,4	53,9	44,4	3,6	7,6	53,4
7	55,0	3,7	8,5	63,6	54,3	3,7	3,5	62,9
8	65,2	3,8	1,3	72,8	64,0	3,8	1,3	71,8
9	75,0	4,0	0,8	81,1	73,7	4,0	0,3	80,0
10	85,0	4,1	0,0	89,0	82,9	4,1	0,0	87,4
11	95,0	4,2	0,0	96,5	93,0	4,2	0,0	95,0
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0					

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	12,1	teor metálico (%) =	9,33	teor metálico (%) =	9,5
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	28,3	teor vol. Balanço fração =	20,5	teor volumétrico beta =	21,8
teor mineral % =	35,0	teor cpy balanço fração % =	27,0	teor mineral (%) =	27,6

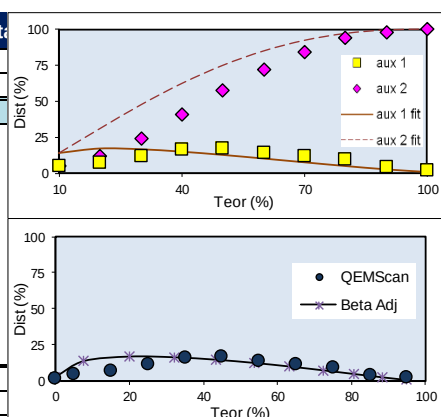
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.2 - Cal 01 - Concentrado Rougher 1 - Fração -212 +150 μm

Ensaio	Cal 01	Conc Rg1	Fração -212 +150 μm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m	Dist simples calculada beta- f _m	Dist simples calculada beta- f _m	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)		
1	0	2,0	0,0	-	-	-	-	-	2,8	0,00		
2	0-10	4,7	5,0	4,77	4,77	13,89	13,89	13,5	5,5			
3	10-20	7,1	15,0	7,21	11,98	30,92	17,03	16,6	15,0			
4	20-30	11,7	25,0	11,94	23,91	47,43	16,50	16,0	24,9			
5	30-40	16,4	35,0	16,69	40,60	62,25	14,83	14,4	34,9			
6	40-50	16,8	45,0	17,18	57,78	74,82	12,57	12,2	44,8			
7	50-60	14,1	55,0	14,44	72,21	84,85	10,02	9,7	54,8			
8	60-70	11,7	65,0	11,95	84,17	92,22	7,37	7,2	64,7			
9	70-80	9,4	75,0	9,58	93,75	97,00	4,78	4,6	74,6			
10	80-90	4,0	85,0	4,05	97,80	99,42	2,42	2,4	84,3			
11	90-100	2,2	95,0	2,20	100,00	100,00	0,58	0,6	92,9			
TOTAL			100,0	45,4	0,5		0,3	100,00	33,7			
				0.3			0.2					

Ajuste com a curva beta					
a	1,28	a ini	1,97	Dens cpy	4,30
b	2,41	b ini	2,29	Dens amostra	3,4
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	4,77	13,89	83,27	78,08
3	10-20	11,98	30,92	358,95	90,12
4	20-30	23,91	47,43	552,92	18,93
5	30-40	40,60	62,25	468,78	3,76
6	40-50	57,78	74,82	290,55	21,25
7	50-60	72,21	84,85	159,56	19,38
8	60-70	84,17	92,22	64,83	20,65
9	70-80	93,75	97,00	10,58	22,46
10	80-90	97,80	99,42	2,65	2,60
11	90-100	100,00	100,00	0,00	2,56
Objetivo		249,56	S2 S1 =	199,21	27,98
$\zeta =$		20	ζ S3 =		16,53
$\eta =$		10	η S4 =	5,85	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	2,0	0,0	0,0	3,0	2,77	0,0
2	5,0	3,1	4,7	7,0	5,5	3,1	13,5	7,6
3	15,0	3,2	7,1	20,1	15,0	3,2	16,6	20,1
4	25,0	3,3	11,7	32,2	24,9	3,3	16,0	32,1
5	35,0	3,5	16,4	43,4	34,9	3,5	14,4	43,3
6	45,0	3,6	16,8	53,8	44,8	3,6	12,2	53,6
7	55,0	3,7	14,1	63,5	54,8	3,7	9,74	63,3
8	65,0	3,9	11,7	72,5	64,7	3,8	7,17	72,3
9	75,0	4,0	9,4	81,0	74,6	4,0	4,65	80,7
10	85,0	4,1	4,0	89,0	84,3	4,1	2,36	88,4
11	95,0	4,2	2,2	96,4	92,9	4,2	0,56	94,9
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 18,1	teor metálico (%) = 13,53	teor metálico (%) = 13,8
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 45,4	teor vol. Balanço fração = 31,1	teor volumétrico beta = 33,7
teor mineral % = 52,3	teor cpy balanço fração % = 39,1	teor mineral (%) = 40,0

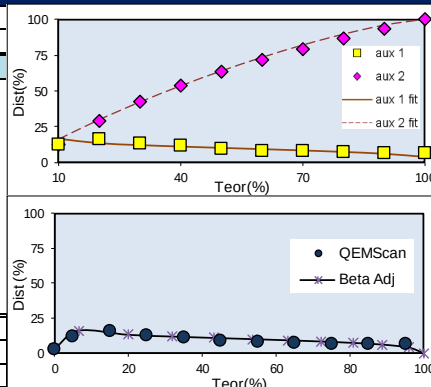
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.3 - Cal 01 - Concentrado Rougher 1 - Fração -150 +74 μm

Ensaio	Cal 01	Conc Rg 2	Fração -150 +74 μm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	2,9	0,0	-	-	-	-	3,2	0,00
2	0-10	12,2	5,0	12,54	12,54	16,69	16,69	16,2	4,7
3	10-20	16,0	15,0	16,48	29,02	30,25	13,57	13,1	14,9
4	20-30	12,9	25,0	13,24	42,26	42,50	12,25	11,9	24,9
5	30-40	11,4	35,0	11,79	54,04	53,74	11,24	10,9	34,9
6	40-50	9,1	45,0	9,34	63,38	64,07	10,33	10,0	44,9
7	50-60	8,1	55,0	8,29	71,68	73,53	9,46	9,2	54,9
8	60-70	7,7	65,0	7,88	79,56	82,07	8,54	8,3	64,9
9	70-80	6,9	75,0	7,10	86,66	89,60	7,53	7,3	74,9
10	80-90	6,4	85,0	6,62	93,29	95,88	6,27	6,1	84,8
11	90-100	6,5	95,0	6,71	100,00	100,00	4,12	4,0	94,3
100			100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL			100,0	40,5	0,4	-	0,4	100,00	38,7
				0,3					
							Gamma		
								9.33	

Ajuste com a curva beta					
a	0,88	a ini	0,88	Dens cpy	4,30
b	1,32	b ini	1,23	Dens amostra	3,5
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	12,54	16,69	17,21	15,85
3	10-20	29,02	30,25	1,53	8,20
4	20-30	42,26	42,50	0,06	0,99
5	30-40	54,04	53,74	0,09	0,32
6	40-50	63,38	64,07	0,48	0,88
7	50-60	71,68	73,53	3,43	1,21
8	60-70	79,56	82,07	6,31	0,38
9	70-80	86,66	89,60	8,65	0,16
10	80-90	93,29	95,88	6,71	0,13
11	90-100	100,00	100,00	0,00	6,38
Objetivo		8,72	S2 S1 =	4,45	3,45
$\zeta =$		5	ζ S3 =	0,60	
$\eta =$		3	η S4 =	0,22	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	2,9	0,0	0,0	3,0	3,19	0,0
2	5,0	3,1	12,2	6,9	4,7	3,1	16,2	6,5
3	15,0	3,2	16,0	20,0	14,9	3,2	13,1	19,9
4	25,0	3,4	12,9	32,0	24,9	3,4	11,9	32,0
5	35,0	3,5	11,4	43,2	34,9	3,5	10,9	43,2
6	45,0	3,6	9,1	53,7	44,9	3,6	10,0	53,6
7	55,0	3,7	8,1	63,4	54,9	3,7	9,15	63,3
8	65,0	3,9	7,7	72,4	64,9	3,9	8,27	72,4
9	75,0	4,0	6,9	80,9	74,9	4,0	7,29	80,8
10	85,0	4,1	6,4	88,9	84,8	4,1	6,07	88,8
11	95,0	4,2	6,5	96,4	94,3	4,2	3,99	95,9
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,00	100,0
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =		16,0	teor metálico (%) =	15,4	teor metálico (%) =
densidade outros minerais =		3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =
teor volumétrico =		40,5	teor vol. Balanço fração	35,7	teor volumétrico beta =
teor mineral % =		46,2	teor cpy balanço fração % =	44,0	teor mineral (%) =
					44,4

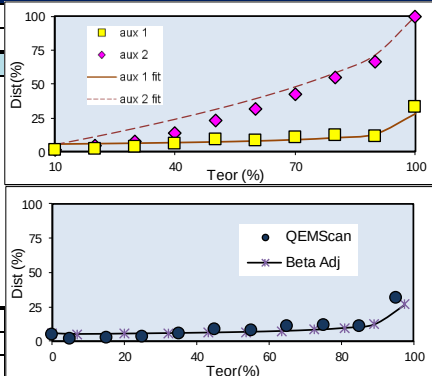
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.4 - Cal 01 - Concentrado Rougher 1 - Fração -74 +44 μm

Ensaio	Cal 01	Conc Rg1		Fração -74 +44 μm								
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	4,67	0,0	-	-	-	-	5,8	0,00			
2	0-10	1,75	5,0	1,83	1,83	5,53	5,53	5,2	5,1			
3	10-20	2,36	15,0	2,47	4,31	11,39	5,86	5,5	15,0			
4	20-30	3,42	25,0	3,59	7,90	17,61	6,22	5,9	25,1			
5	30-40	5,79	35,0	6,07	13,97	24,25	6,65	6,3	35,1			
6	40-50	8,65	45,0	9,08	23,05	31,44	7,18	6,8	45,1			
7	50-60	8,25	55,0	8,65	31,70	39,31	7,88	7,4	55,1			
8	60-70	10,6	65,0	11,12	42,82	48,15	8,84	8,3	65,1			
9	70-80	11,5	75,0	12,03	54,84	58,47	10,32	9,7	75,2			
10	80-90	11,1	85,0	11,64	66,49	71,59	13,12	12,4	85,3			
11	90-100	31,9	95,0	33,51	100,00	100,00	28,41	26,8	96,5			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	67,0	0,7			0,6	100,00	61,0			
				0,6			0,5					
							Gama	24.04				

Ajuste com a curva beta					
a	1,01	a ini	1,68	Dens cpy	4,3
b	0,55	b ini	0,71	Dens amostra	3,8
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	1,83	5,53	13,65	11,97
3	10-20	4,31	11,39	50,13	9,99
4	20-30	7,90	17,61	94,27	5,94
5	30-40	13,97	24,25	105,79	0,23
6	40-50	23,05	31,44	70,40	3,56
7	50-60	31,70	39,31	58,02	0,68
8	60-70	42,82	48,15	28,48	5,17
9	70-80	54,84	58,47	13,18	3,04
10	80-90	66,49	71,59	26,07	1,58
11	90-100	100,00	100,00	0,00	26,90
Objetivo		66,07	S2 S1 =	46,00	6,91
$\zeta =$		10	ζ S3 =		6,86
$\eta =$		5	η S4 =	6,31	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	4,7	0,0	0,0	3,0	5,80	0,0
2	5,0	3,1	1,7	6,9	5,1	3,1	5,21	7,0
3	15,0	3,2	2,4	20,0	15,0	3,2	5,52	20,0
4	25,0	3,4	3,4	32,0	25,1	3,4	5,86	32,1
5	35,0	3,5	5,8	43,2	35,1	3,5	6,26	43,3
6	45,0	3,6	8,7	53,6	45,1	3,6	6,77	53,7
7	55,0	3,7	8,2	63,3	55,1	3,7	7,42	63,4
8	65,0	3,9	10,6	72,4	65,1	3,9	8,33	72,5
9	75,0	4,0	11,5	80,9	75,2	4,0	9,7	81,1
10	85,0	4,1	11,1	88,9	85,3	4,1	12,4	89,1
11	95,0	4,2	31,9	96,4	96,5	4,3	26,8	97,5
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0					
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 24,8	teor metálico (%) = 22,35	teor metálico (%) = 22,6
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 67,0	teor vol. Balanço fração = 56,3	teor volumétrico beta = 61,0
teor mineral % = 71,7	teor cpy balanço fração % = 64,6	teor mineral (%) = 65,4

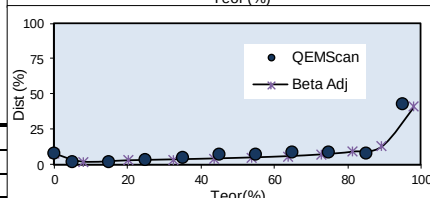
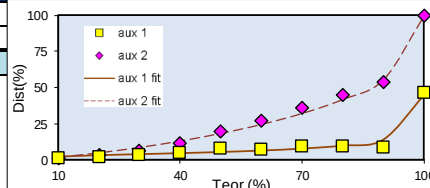
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.5 - Cal 01 - Concentrado Rougher 1 - Fração -44 +20 μm

Ensaio	Cal 01	Conc Rg1	Fração -44 +20 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	7,9	0,0	-	-	-	-	7,7	0,00	
2	0-10	1,3	5,0	1,41	1,41	2,04	2,04	1,9	5,6	
3	10-20	1,8	15,0	1,94	3,35	5,07	3,03	2,8	15,2	
4	20-30	2,9	25,0	3,14	6,49	8,80	3,74	3,5	25,2	
5	30-40	4,6	35,0	5,04	11,53	13,25	4,45	4,1	35,1	
6	40-50	7,2	45,0	7,86	19,39	18,50	5,25	4,8	45,1	
7	50-60	6,7	55,0	7,27	26,66	24,74	6,24	5,8	55,2	
8	60-70	8,2	65,0	8,95	35,60	32,33	7,59	7,0	65,2	
9	70-80	8,8	75,0	9,54	45,15	42,00	9,67	8,9	75,2	
10	80-90	8,0	85,0	8,70	53,85	55,72	13,73	12,7	85,4	
11	90-100	42,5	95,0	46,15	100,00	100,00	44,28	40,9	97,2	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	68,8	0,7			0,8	100,00	70,0	
				0,6			0,6			
							Gama	-2,58		

Ajuste com a curva beta					
a	1,26	a ini	1,61	Dens cpy	4,30
b	0,40	b ini	0,55	Dens amostra	3,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	1,41	2,04	0,39	0,34
3	10-20	3,35	5,07	2,94	1,02
4	20-30	6,49	8,80	5,36	0,31
5	30-40	11,53	13,25	2,96	0,29
6	40-50	19,39	18,50	0,79	5,74
7	50-60	26,66	24,74	3,67	0,87
8	60-70	35,60	32,33	10,72	1,53
9	70-80	45,15	42,00	9,92	0,02
10	80-90	53,85	55,72	3,52	21,70
11	90-100	100,00	100,00	0,00	2,68
Objetivo		7,60	S2 S1 =	4,03	3,45
$\zeta =$		6	ζ S3 =		0,04
$\eta =$		2	η S4 =	0,08	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	7,9	0,0	0,0	3,0	7,65	0,0
2	5,0	3,1	1,3	7,0	5,6	3,1	1,88	7,8
3	15,0	3,2	1,8	20,1	15,2	3,2	2,80	20,3
4	25,0	3,3	2,9	32,2	25,2	3,3	3,45	32,3
5	35,0	3,5	4,6	43,4	35,1	3,5	4,11	43,5
6	45,0	3,6	7,2	53,8	45,1	3,6	4,85	53,9
7	55,0	3,7	6,7	63,5	55,2	3,7	5,76	63,6
8	65,0	3,9	8,2	72,5	65,2	3,9	7,01	72,7
9	75,0	4,0	8,8	81,0	75,2	4,0	8,9	81,2
10	85,0	4,1	8,0	89,0	85,4	4,1	12,7	89,2
11	95,0	4,2	42,5	96,4	97,2	4,3	40,9	98,0
	100,0	4,3			100,0	4,3		100,0
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	25,2	teor metálico (%) =	25,50	teor metálico (%) =	25,5
densidade outros minerais =	3,0	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	68,8	teor vol. Balanço fração =	66,3	teor volumétrico beta =	70,0
teor mineral % =	72,8	teor cpy balanço fração % =	73,7	teor mineral (%) =	73,6

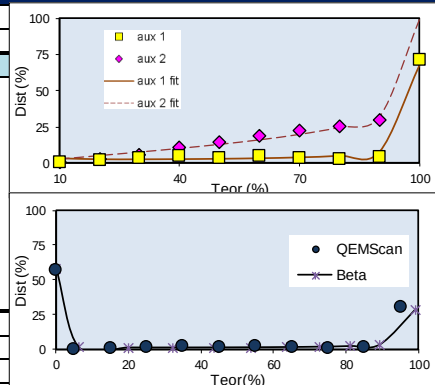
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.6 - Cal 01 - Concentrado Rougher 1 - Fração -20 µm

Ensaio	Cal 01	Conc Rg 1	Fração -20 µm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	57,2	0,0	-	-	-	-	58,1	0,00			
2	0-10	0,35	5,0	0,83	0,83	3,11	3,11	1,3	4,4			
3	10-20	0,79	15,0	1,86	2,68	5,56	2,45	1,0	15,0			
4	20-30	1,47	25,0	3,43	6,11	7,98	2,42	1,0	25,0			
5	30-40	2,02	35,0	4,72	10,84	10,52	2,54	1,1	35,1			
6	40-50	1,56	45,0	3,64	14,48	13,28	2,77	1,2	45,1			
7	50-60	2,02	55,0	4,71	19,18	16,43	3,14	1,3	55,1			
8	60-70	1,55	65,0	3,62	22,80	20,19	3,76	1,6	65,2			
9	70-80	1,11	75,0	2,58	25,39	25,06	4,87	2,0	75,3			
10	80-90	1,99	85,0	4,63	30,02	32,53	7,47	3,1	85,5			
11	90-100	30,5	95,0	71,22	101,24	100,00	67,47	28,3	98,7			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,5	35,5	0,8			0,8	100,00	35,2			
				0,7			0,8					
							Gama	1.65				

Ajuste com a curva beta					
a	0,78	a ini	1,61	Dens cpy	4,3
b	0,15	b ini	0,33	Dens amostra	3,4
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	0,83	3,11	5,21	0,90
3	10-20	2,68	5,56	8,26	0,05
4	20-30	6,11	7,98	3,48	0,21
5	30-40	10,84	10,52	0,10	0,92
6	40-50	14,48	13,28	1,42	0,16
7	50-60	19,18	16,43	7,59	0,49
8	60-70	22,80	20,19	6,86	0,00
9	70-80	25,39	25,06	0,11	0,87
10	80-90	30,02	32,53	6,30	1,31
11	90-100	101,24	100,00	1,54	5,03
Objetivo		13,63	S2 S1 =	8,17	0,99
ζ =		1	ζ S3 =		0,03
η =		5	η S4 =	4,44	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	57,2	0,0	0,0	3,0	58,1	0,0
2	5,0	3,1	0,4	7,0	4,4	3,1	1,30	6,2
3	15,0	3,2	0,8	20,1	15,0	3,2	1,03	20,0
4	25,0	3,3	1,5	32,2	25,0	3,3	1,01	32,2
5	35,0	3,5	2,0	43,4	35,1	3,5	1,06	43,5
6	45,0	3,6	1,6	53,8	45,1	3,6	1,16	53,9
7	55,0	3,7	2,0	63,5	55,1	3,7	1,32	63,6
8	65,0	3,9	1,6	72,6	65,2	3,9	1,57	72,7
9	75,0	4,0	1,1	81,0	75,3	4,0	2,04	81,3
10	85,0	4,1	2,0	89,0	85,5	4,1	3,13	89,3
11	95,0	4,2	30,5	96,4	98,7	4,3	28,26	99,1
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,5				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 12,8	teor metálico (%) = 12,45	teor metálico (%) = 12,5
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 35,5	teor vol. Balanço fração = 28,3	teor volumétrico beta = 35,2
teor mineral % = 36,9	teor cpy balanço fração % = 36,0	teor mineral (%) = 36,1

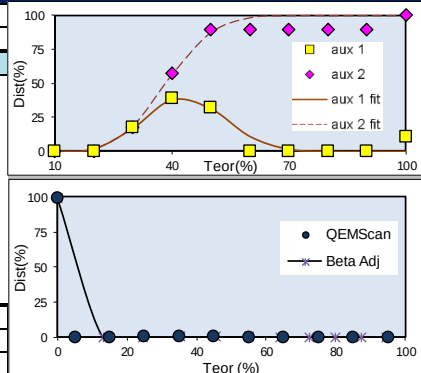
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.7 - Cal 01- Rejeito Rougher 2 -Fração +212 μm

Ensaio	Cal 01	Rej Rg2	Fração +212 µm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _{m mista,j}	Dist auxiliar sem ganga acumulad a - F _m	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m	Dist auxiliar simples calculada beta- f _{m mista beta,j}	Dist simples calculada beta- f _{m beta,j}	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
					mista,j	mista,beta,j	beta,j			
1	0	99,3	0,0	-	-	-	-	99,40	0,00	
2	0-10	0,0	5,0	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	8,9	
3	10-20	0,0	15,0	0,00	0,00	1,81	1,80	0,01	17,5	
4	20-30	0,1	25,0	17,88	17,88	18,70	16,90	0,10	26,2	
5	30-40	0,3	35,0	39,19	57,07	56,29	37,58	0,22	35,2	
6	40-50	0,2	45,0	32,25	89,32	87,45	31,16	0,19	44,5	
7	50-60	0,0	55,0	0,00	89,32	98,40	10,95	0,07	53,8	
8	60-70	0,0	65,0	0,00	89,32	99,94	1,53	0,01	63,0	
9	70-80	0,0	75,0	0,00	89,32	100,00	0,06	0,00	72,2	
10	80-90	0,0	85,0	0,00	89,32	100,00	0,00	0,00	82,0	
11	90-100	0,1	95,0	10,68	100,00	100,00	0,00	0,00	92,0	
			100,0	-	-	-	-	0,00	100,00	
TOTAL		100,0	0,3	0,4			0,4	100,00	0,2	
				0,2						
							Gama	0.07		

Ajuste com a curva beta					
a	9,64	aini	2,38	Dens cpy	4,30
b	15,25	bini	3,18	Dens amostra	2,8
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	0,00	0,01	0,00	0,00
3	10-20	0,00	1,81	3,27	0,00
4	20-30	17,88	18,70	0,67	0,00
5	30-40	57,07	56,29	0,61	0,00
6	40-50	89,32	87,45	3,51	0,00
7	50-60	89,32	98,40	82,48	0,00
8	60-70	89,32	99,94	112,67	0,00
9	70-80	89,32	100,00	114,03	0,00
10	80-90	89,32	100,00	114,04	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		43,13	S2 S1 =	43,13	0,00
$\zeta =$		10	ζ S3 =		0,00
$\eta =$		1	η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,8	99,3	0,0	0,0	2,8	99,4	0,0
2	5,0	2,9	0,0	7,5	8,9	2,9	0,0	13,1
3	15,0	3,0	0,0	21,3	17,5	3,1	0,0	24,6
4	25,0	3,2	0,1	33,9	26,2	3,2	0,1	35,3
5	35,0	3,3	0,3	45,3	35,2	3,3	0,2	45,5
6	45,0	3,5	0,2	55,7	44,5	3,5	0,2	55,2
7	55,0	3,6	0,0	65,3	53,8	3,6	0,1	64,1
8	65,0	3,8	0,0	74,1	63,0	3,7	0,0	72,4
9	75,0	3,9	0,0	82,2	72,2	3,9	0,0	80,0
10	85,0	4,1	0,0	89,7	82,0	4,0	0,0	87,5
11	95,0	4,2	0,1	96,7	92,0	4,2	0,0	94,6
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0					

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 0,1	teor metálico (%) = 0,10	teor metálico (%) = 0,1
densidade outros minerais = 2,8	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 2,8
teor volumétrico = 0,3	teor vol. Balanço fração = 0,2	teor volumétrico beta = 0,2
teor mineral % = 0,3	teor cpy balanço fração % = 0,29	teor mineral (%) = 0,29

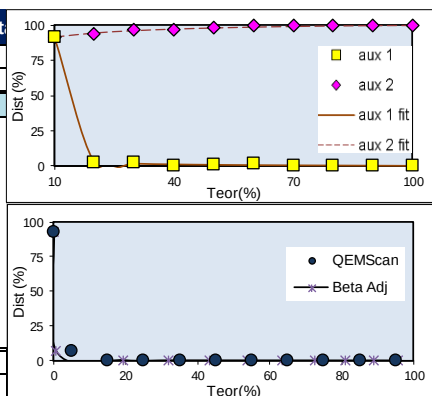
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.8 - Cal 01- Rejeito Rougher 2 -Fração -212 +150 μm

Ensaio	Cal 01	Rej Rg 2	Fração -212 +150 μm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	92,6	0,0	-	-	-	-	92,7	0,00
2	0-10	6,8	5,0	91,68	91,68	91,50	91,50	6,66	0,5
3	10-20	0,2	15,0	2,36	94,04	94,48	2,98	0,22	14,4
4	20-30	0,2	25,0	2,53	96,56	96,17	1,69	0,12	24,6
5	30-40	0,0	35,0	0,00	96,56	97,32	1,14	0,08	34,7
6	40-50	0,1	45,0	1,33	97,90	98,15	0,83	0,06	44,8
7	50-60	0,1	55,0	1,71	99,61	98,78	0,63	0,05	54,8
8	60-70	0,0	65,0	0,00	99,61	99,26	0,48	0,03	64,8
9	70-80	0,0	75,0	0,00	99,61	99,62	0,36	0,03	74,7
10	80-90	0,0	85,0	0,00	99,61	99,87	0,25	0,02	84,7
11	90-100	0,0	95,0	0,39	100,00	100,00	0,13	0,01	94,0
			100,0	-	-	-	-		100,00
TOTAL			100,0	0,6	0,1		0,0	100,00	0,2
				0,0			0,0		
							Gamma	0.10	

Ajuste com a curva bet					
a	0,05	a ini	0,43	Dens cpy	4,30
b	1,45	b ini	5,34	Dens amostra	3,0
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	91,68	91,50	0,03	0,01
3	10-20	94,04	94,48	0,20	0,00
4	20-30	96,56	96,17	0,15	0,00
5	30-40	96,56	97,32	0,57	0,01
6	40-50	97,90	98,15	0,06	0,00
7	50-60	99,61	98,78	0,68	0,01
8	60-70	99,61	99,26	0,12	0,00
9	70-80	99,61	99,62	0,00	0,00
10	80-90	99,61	99,87	0,07	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		0,20	S2 S1 =	0,19	0,00
$\zeta =$		5	ζ S3 =		0,01
$\eta =$		1	η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	92,6	0,0	0,0	3,0	92,7	0,0
2	5,0	3,1	6,8	7,0	0,5	3,0	6,66	0,7
3	15,0	3,2	0,2	20,2	14,4	3,2	0,22	19,5
4	25,0	3,3	0,2	32,3	24,6	3,3	0,12	31,9
5	35,0	3,5	0,0	43,6	34,7	3,4	0,08	43,3
6	45,0	3,6	0,1	54,0	44,8	3,6	0,06	53,7
7	55,0	3,7	0,1	63,7	54,8	3,7	0,05	63,5
8	65,0	3,8	0,0	72,7	64,8	3,8	0,03	72,5
9	75,0	4,0	0,0	81,1	74,7	4,0	0,03	80,9
10	85,0	4,1	0,0	89,0	84,7	4,1	0,02	88,8
11	95,0	4,2	0,0	96,5	94,0	4,2	0,01	95,7
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,3	teor metálico (%) =	0,09	teor metálico (%) =	0,1
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	0,6	teor vol. Balanço fração =	0,17	teor volumétrico beta =	0,2
teor mineral % =	0,7	teor cpy balanço fração % =	0,25	teor mineral (%) =	0,29

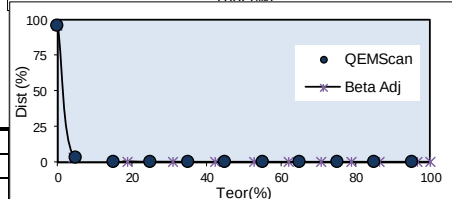
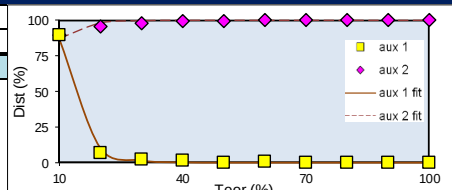
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.9 - Cal 01- Rejeito Rougher 2 -Fração -150+74 μm

Ensaio	Cal 01	Rej Rg2	Fração -150 +74 µm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	96,1	0,0	-	-	-	-	96,2	0,00			
2	0-10	3,5	5,0	89,57	89,57	87,58	87,58	3,3	2,9			
3	10-20	0,2	15,0	6,46	96,02	98,18	10,60	0,4	13,5			
4	20-30	0,1	25,0	1,99	98,01	99,78	1,60	0,1	23,5			
5	30-40	0,1	35,0	1,53	99,54	99,98	0,20	0,0	33,3			
6	40-50	0,0	45,0	0,00	99,54	100,00	0,02	0,0	43,1			
7	50-60	0,0	55,0	0,46	100,00	100,00	0,00	0,0	52,8			
8	60-70	0,0	65,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	62,4			
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	71,8			
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	81,2			
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	95,1			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	0,3	0,1			0,0	100,00	0,2			
				0,0			0,0					
							Gamma	0,10				

Ajuste com a curva beta					
a	0,70	a ini	1,08	Dens cpy	4,30
b	15,00	b ini	15,02	Dens amostra	2,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	89,57	87,58	3,95	0,03
3	10-20	96,02	98,18	4,65	0,02
4	20-30	98,01	99,78	3,12	0,00
5	30-40	99,54	99,98	0,20	0,00
6	40-50	99,54	100,00	0,21	0,00
7	50-60	100,00	100,00	0,00	0,00
8	60-70	100,00	100,00	0,00	0,00
9	70-80	100,00	100,00	0,00	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		1,26	S2 S1 =	1,21	0,01
$\zeta =$		5	ζ S3 =		0,00
$\eta =$		5	η S4 =	0,05	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	96,1	0,0	0,0	2,9	96,23	0,0
2	5,0	3,0	3,5	7,2	2,9	3,0	3,3	4,3
3	15,0	3,1	0,2	20,6	13,5	3,1	0,4	18,7
4	25,0	3,3	0,1	32,9	23,5	3,2	0,1	31,0
5	35,0	3,4	0,1	44,2	33,3	3,4	0,0	42,3
6	45,0	3,5	0,0	54,6	43,1	3,5	0,0	52,6
7	55,0	3,7	0,0	64,2	52,8	3,7	0,00	62,1
8	65,0	3,8	0,0	73,2	62,4	3,8	0,00	70,9
9	75,0	4,0	0,0	81,5	71,8	3,9	0,00	78,9
10	85,0	4,1	0,0	89,3	81,2	4,0	0,00	86,4
11	95,0	4,2	0,0	96,5	95,1	4,2	0,00	96,6
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,00	100,0
100,0							100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,1	teor metálico (%) =	0,08	teor metálico (%) =	0,1
densidade outros minerais =	2,9	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,9
teor volumétrico =	0,3	teor vol. Balanço fração =	0,16	teor volumétrico beta =	0,2
teor mineral % =	0,4	teor cpy balanço fração % =	0,24	teor mineral (%) =	0,24

Nilce Alves dos Santos

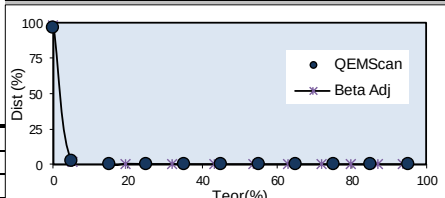
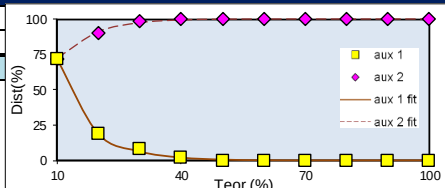
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.10 - Cal 01- Rejeito Rougher 2 -Fração -74+44 μm

Ensaio	Cal 01	Rej Rg2	Fração -74 +44 μm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	96,8	0,0	-	-	-	-	98,0	0,00			
2	0-10	2,3	5,0	71,53	71,53	72,10	72,10	1,4	3,5			
3	10-20	0,6	15,0	18,55	90,08	90,99	18,90	0,4	14,1			
4	20-30	0,3	25,0	8,21	98,29	97,35	6,35	0,1	24,1			
5	30-40	0,1	35,0	1,71	100,00	99,33	1,98	0,0	34,0			
6	40-50	0,0	45,0	0,00	100,00	99,87	0,54	0,0	43,9			
7	50-60	0,0	55,0	0,00	100,00	99,98	0,12	0,0	53,6			
8	60-70	0,0	65,0	0,00	100,00	100,00	0,02	0,0	63,3			
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	72,8			
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	82,1			
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	91,0			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	0,3	0,1			0,1	100,00	0,2			
				0,0			0,0					

Gama 1,23

Ajuste com a curva beta					
a	0,71	a ini	1,37	Dens cpy	4,3
b	8,50	b ini	13,81	Dens amostra	2,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	71,53	72,10	0,32	0,71
3	10-20	90,08	90,99	0,83	0,05
4	20-30	98,29	97,35	0,89	0,02
5	30-40	100,00	99,33	0,45	0,00
6	40-50	100,00	99,87	0,02	0,00
7	50-60	100,00	99,98	0,00	0,00
8	60-70	100,00	100,00	0,00	0,00
9	70-80	100,00	100,00	0,00	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		2,18	S2 S1 =	0,25	0,08
$\zeta =$		400	ζ S3 =		0,43
$\eta =$		1	η S4 =	1,42	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	96,8	0,0	0,0	2,9	98,03	0,0
2	5,0	3,0	2,3	7,2	3,5	3,0	1,42	5,0
3	15,0	3,1	0,6	20,6	14,1	3,1	0,37	19,5
4	25,0	3,3	0,3	32,9	24,1	3,3	0,13	31,9
5	35,0	3,4	0,1	44,2	34,0	3,4	0,04	43,1
6	45,0	3,5	0,0	54,7	43,9	3,5	0,01	53,5
7	55,0	3,7	0,0	64,3	53,6	3,7	0,00	63,0
8	65,0	3,8	0,0	73,2	63,3	3,8	0,00	71,8
9	75,0	4,0	0,0	81,6	72,8	3,9	0,0	79,8
10	85,0	4,1	0,0	89,3	82,1	4,1	0,0	87,1
11	95,0	4,2	0,0	96,6	91,0	4,2	0,0	93,7
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0					
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,1	teor metálico (%) =	0,06	teor metálico (%) =	0,07
densidade outros minerais =	2,9	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,92
teor volumétrico =	0,3	teor vol. Balanço fração =	0,12	teor volumétrico beta =	0,15
teor mineral % =	0,4	teor cpy balanço fração % =	0,18	teor mineral (%) =	0,21

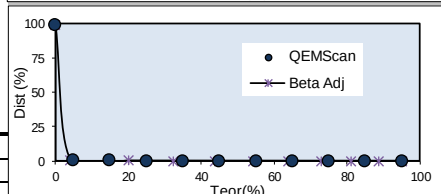
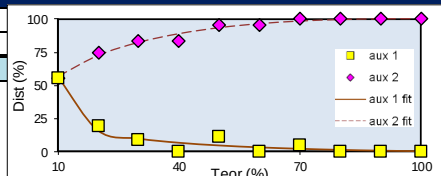
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)- Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.11 - Cal 01- Rejeito Rougher 2 -Fração -44+20 μm

Ensaio	Cal 01	Rej Rg2	Fração -44 +20 μm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	98,7	0,0	-	-	-	-	98,6	0,00
2	0-10	0,74	5,0	55,68	55,68	56,76	56,76	0,8	2,8
3	10-20	0,25	15,0	19,00	74,68	72,53	15,77	0,2	14,5
4	20-30	0,12	25,0	9,11	83,79	82,24	9,71	0,1	24,7
5	30-40	0,00	35,0	0,00	83,79	88,78	6,53	0,1	34,7
6	40-50	0,15	45,0	11,48	95,27	93,25	4,48	0,1	44,7
7	50-60	0,00	55,0	0,00	95,27	96,28	3,02	0,0	54,7
8	60-70	0,06	65,0	4,73	100,00	98,22	1,95	0,0	64,6
9	70-80	0,00	75,0	0,00	100,00	99,35	1,13	0,0	74,5
10	80-90	0,00	85,0	0,00	100,00	99,88	0,53	0,0	84,2
11	90-100	0,00	95,0	0,00	100,00	100,00	0,12	0,0	92,9
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
	TOTAL	100,0	0,2	0,2			0,1	100,00	0,2
				0,1			0,1		
							Gama	-0,07	

Ajuste com a curva beta					
a	0,41	a ini	0,61	Dens cpy	4,30
b	2,37	b ini	3,15	Dens amostra	2,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	55,68	56,76	1,17	0,00
3	10-20	74,68	72,53	4,63	0,00
4	20-30	83,79	82,24	2,40	0,00
5	30-40	83,79	88,78	24,83	0,01
6	40-50	95,27	93,25	4,06	0,01
7	50-60	95,27	96,28	1,02	0,00
8	60-70	100,00	98,22	3,16	0,00
9	70-80	100,00	99,35	0,42	0,00
10	80-90	100,00	99,88	0,01	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
	Objetivo	4,20	S2 S1 =	4,17	0,00
	$\zeta =$	5	ζ S3 =		0,03
	$\eta =$	1	η S4 =	0,00	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	98,7	0,0	0,0	2,9	98,61	0,0
2	5,0	3,0	0,7	7,2	2,8	3,0	0,79	4,1
3	15,0	3,1	0,3	20,6	14,5	3,1	0,22	20,0
4	25,0	3,3	0,1	32,9	24,7	3,3	0,14	32,5
5	35,0	3,4	0,0	44,2	34,7	3,4	0,09	43,8
6	45,0	3,5	0,2	54,6	44,7	3,5	0,06	54,3
7	55,0	3,7	0,0	64,2	54,7	3,7	0,04	63,9
8	65,0	3,8	0,1	73,2	64,6	3,8	0,03	72,8
9	75,0	4,0	0,0	81,5	74,5	3,9	0,02	81,1
10	85,0	4,1	0,0	89,3	84,2	4,1	0,01	88,7
11	95,0	4,2	0,0	96,5	92,9	4,2	0,00	95,1
	100,0	4,3			100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 0,1	teor metálico (%) = 0,12	teor metálico (%) = 0,1
densidade outros minerais = 2,9	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 2,9
teor volumétrico = 0,2	teor vol. Balanço fração = 0,2	teor volumétrico beta = 0,2
teor mineral % = 0,3	teor cpy balanço fração % = 0,3	teor mineral (%) = 0,3

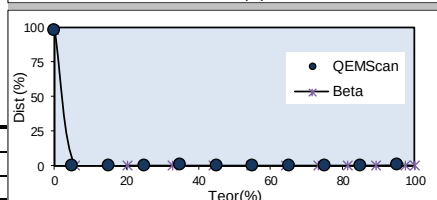
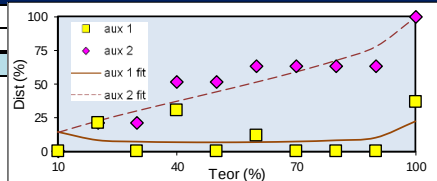
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.12 - Cal 01- Rejeito Rougher 2 -Fração -20 μm

Ensaio	Cal 01	Rej Rg 2	Fração -20 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%			aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)		Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	97,8	0,0	-	-	-	-	-	98,3	0,00
2	0-10	0,0	5,0	0,00	0,00	14,41	14,41	0,2	4,0	
3	10-20	0,5	15,0	20,79	20,79	22,97	8,56	0,1	14,8	
4	20-30	0,0	25,0	0,00	20,79	30,48	7,51	0,1	24,9	
5	30-40	0,7	35,0	30,78	51,57	37,59	7,11	0,1	35,0	
6	40-50	0,0	45,0	0,00	51,57	44,61	7,02	0,1	45,0	
7	50-60	0,3	55,0	11,45	63,02	51,77	7,17	0,1	55,0	
8	60-70	0,0	65,0	0,00	63,02	59,37	7,59	0,1	65,1	
9	70-80	0,0	75,0	0,00	63,02	67,81	8,45	0,1	75,1	
10	80-90	0,0	85,0	0,00	63,02	78,13	10,31	0,2	85,2	
11	90-100	0,8	95,0	36,98	100,00	100,00	21,87	0,4	96,5	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	1,2	0,6			0,5	100,00	0,9	
				0,4			0,4			
							Gama	0,55		

Ajuste com a curva beta					
a	0,64	a ini	0,75	Dens cpy	4,3
b	0,54	b ini	0,61	Dens amostra	2,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	0,00	14,41	207,73	0,06
3	10-20	20,79	22,97	4,73	0,10
4	20-30	20,79	30,48	93,85	0,02
5	30-40	51,57	37,59	195,57	0,31
6	40-50	51,57	44,61	48,54	0,01
7	50-60	63,02	51,77	126,44	0,02
8	60-70	63,02	59,37	13,34	0,02
9	70-80	63,02	67,81	22,98	0,02
10	80-90	63,02	78,13	228,26	0,03
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,20
Objetivo		94,22	S2 S1 =	94,14	0,08
$\zeta =$		5	ζ S3 =		0,00
$\eta =$			η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	97,8	0,0	0,0	2,9	98,35	0,0
2	5,0	3,0	0,0	7,2	4,0	3,0	0,24	5,7
3	15,0	3,1	0,5	20,6	14,8	3,1	0,14	20,4
4	25,0	3,3	0,0	32,8	24,9	3,3	0,12	32,8
5	35,0	3,4	0,7	44,1	35,0	3,4	0,12	44,1
6	45,0	3,5	0,0	54,6	45,0	3,5	0,12	54,6
7	55,0	3,7	0,3	64,2	55,0	3,7	0,12	64,2
8	65,0	3,8	0,0	73,2	65,1	3,8	0,13	73,2
9	75,0	4,0	0,0	81,5	75,1	4,0	0,14	81,6
10	85,0	4,1	0,0	89,3	85,2	4,1	0,17	89,4
11	95,0	4,2	0,8	96,5	96,5	4,3	0,36	97,6
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,5	teor metálico (%) =	0,34	teor metálico (%) =	0,3
densidade outros minerais =	2,9	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,9
teor volumétrico =	1,2	teor vol. Balanço fração =	0,7	teor volumétrico beta =	0,9
teor mineral % =	1,3	teor cpy balanço fração % =	1,0	teor mineral (%) =	1,0

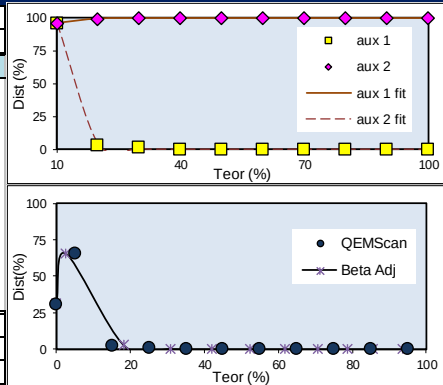
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.13 - Cal 01 - Concentrado Scavenger - Fração +212 μm

Ensaio Cal 01		Conc Scavenger		Fração +212 μm					
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - $f_{m \text{ mista},j}$	Dist auxiliar sem ganga acumulada - $F_{m \text{ mista},j}$	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F_m	Dist auxiliar simples calculada beta- $f_{m \text{ mista}}$	Dist simples calculada beta- $f_{m \text{ beta},j}$	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	31,0	0,0	-	-	-	-	31,2	0,00
2	0-10	66,0	5,0	95,59	95,59	95,61	95,61	65,8	1,7
3	10-20	2,0	15,0	2,90	98,49	99,57	3,96	2,7	13,2
4	20-30	1,0	25,0	1,45	99,94	99,96	0,39	0,3	23,2
5	30-40	0,0	35,0	0,06	100,00	100,00	0,03	0,0	33,0
6	40-50	0,0	45,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	42,8
7	50-60	0,0	55,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	52,5
8	60-70	0,0	65,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	62,1
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	71,6
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	80,0
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	91,0
TOTAL		100,0	3,9	0,1	-	-	-	0,0	100,00
				0,0			0,0		
							Gama	0,68	

Ajuste com a curva beta					
a	0,40	aini	3,28	Dens cpy	4,30
b	17,05	bini	55,35	Dens amostra	3,0
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	95,59	95,61	0,00	0,04
3	10-20	98,49	99,57	1,16	0,52
4	20-30	99,94	99,96	0,00	0,53
5	30-40	100,00	100,00	0,00	0,00
6	40-50	100,00	100,00	0,00	0,00
7	50-60	100,00	100,00	0,00	0,00
8	60-70	100,00	100,00	0,00	0,00
9	70-80	100,00	100,00	0,00	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		0,29	S2 S1 =	0,12	0,11
$\zeta =$		10	ζ S3 =		0,02
$\eta =$		1	η S4 =	0,04	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	31,0	0,0	0,0	2,9	31,2	0,0
2	5,0	3,0	66,0	7,2	1,7	3,0	65,8	2,5
3	15,0	3,1	2,0	20,6	13,2	3,1	2,7	18,3
4	25,0	3,3	1,0	32,9	23,2	3,2	0,3	30,7
5	35,0	3,4	0,0	44,2	33,0	3,4	0,0	42,0
6	45,0	3,5	0,0	54,6	42,8	3,5	0,0	52,4
7	55,0	3,7	0,0	64,2	52,5	3,6	0,0	61,9
8	65,0	3,8	0,0	73,2	62,1	3,8	0,0	70,7
9	75,0	4,0	0,0	81,5	71,6	3,9	0,0	78,8
10	85,0	4,1	0,0	89,3	80,0	4,0	0,0	85,5
11	95,0	4,2	0,0	96,5	91,0	4,2	0,0	93,7
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 1,9	teor metálico (%) = 0,80	teor metálico (%) = 0,8
densidade outros minerais = 2,9	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 2,9
teor volumétrico = 3,9	teor vol. Balanço fração = 1,6	teor volumétrico beta = 1,6
teor mineral % = 5,5	teor cpy balanço fração % = 2,3	teor mineral (%) = 2,3

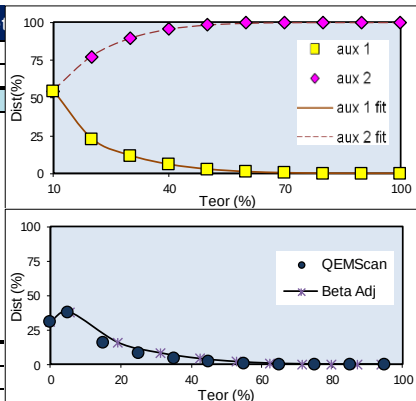
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.14 - Cal 01 - Concentrado Scavenger - Fração -212 +150 μ m

Ensaio	Cal 01	Conc Scavenger	Fração -212 +150 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	30,9	0,0	-	-	-	-	31,0	0,00
2	0-10	37,6	5,0	54,37	54,37	54,79	54,79	37,8	3,9
3	10-20	15,8	15,0	22,90	77,27	77,68	22,89	15,8	14,4
4	20-30	8,3	25,0	11,98	89,25	89,54	11,87	8,2	24,5
5	30-40	4,2	35,0	6,11	95,36	95,54	5,99	4,1	34,4
6	40-50	2,0	45,0	2,89	98,25	98,34	2,80	1,9	44,3
7	50-60	0,8	55,0	1,21	99,46	99,50	1,16	0,8	54,2
8	60-70	0,3	65,0	0,42	99,88	99,89	0,39	0,3	64,0
9	70-80	0,1	75,0	0,11	99,99	99,99	0,10	0,1	73,7
10	80-90	0,0	85,0	0,01	100,00	100,00	0,01	0,0	83,0
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	91,6
			100,0	-	-	-	-		100,00
TOTAL		100,0	9,4	0,1			0,1	100,00	8,7
				0,0			0,0		
							Gamma	0,27	

Ajuste com a curva beta					
a	0,75	a ini	0,94	Dens cpy	4,30
b	5,20	b ini	5,94	Dens amostra	3,2
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	54,37	54,79	0,17	0,06
3	10-20	77,27	77,68	0,17	0,00
4	20-30	89,25	89,54	0,09	0,01
5	30-40	95,36	95,54	0,03	0,01
6	40-50	98,25	98,34	0,01	0,00
7	50-60	99,46	99,50	0,00	0,00
8	60-70	99,88	99,89	0,00	0,00
9	70-80	99,99	99,99	0,00	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo	0,47	S2 S1 =	0,05	0,01	
$\zeta =$	1	ζ S3 =		0,41	
$\eta =$	1	η S4 =	0,01		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,1	30,9	0,0	0,0	3,1	31,0	0,0
2	5,0	3,1	37,6	6,9	3,9	3,1	37,8	5,4
3	15,0	3,3	15,8	19,8	14,4	3,2	15,8	19,1
4	25,0	3,4	8,3	31,8	24,5	3,4	8,2	31,2
5	35,0	3,5	4,2	43,0	34,4	3,5	4,1	42,4
6	45,0	3,6	2,0	53,4	44,3	3,6	1,9	52,7
7	55,0	3,7	0,8	63,1	54,2	3,7	0,8	62,4
8	65,0	3,9	0,3	72,2	64,0	3,9	0,3	71,4
9	75,0	4,0	0,1	80,8	73,7	4,0	0,1	79,7
10	85,0	4,1	0,0	88,8	83,0	4,1	0,0	87,2
11	95,0	4,2	0,0	96,4	91,6	4,2	0,0	93,9
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 4,2	teor metálico (%) = 3,54	teor metálico (%) = 3,9
densidade outros minerais = 3,1	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,1
teor volumétrico = 9,4	teor vol. Balanço fração = 7,5	teor volumétrico beta = 8,7
teor mineral % = 12,0	teor cpy balanço fração % = 10,2	teor mineral (%) = 11,1

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

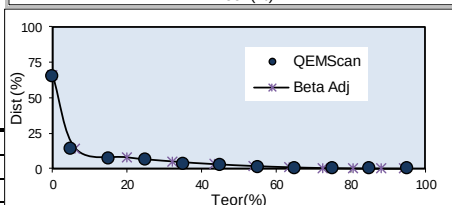
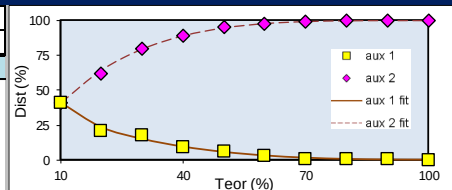
A-V.1.15 - Cal 01 - Concentrado Scavenger - Fração -150 +74 μ m

Ensaio	Cal 01	Conc Scavenger		Fração -150 +74 μm						
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%			aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	38,4	0,0	-	-	-	-	39,3	0,00	
2	0-10	25,1	5,0	40,80	40,80	46,96	46,96	28,5	4,2	
3	10-20	12,7	15,0	20,65	61,45	70,64	23,68	14,4	14,6	
4	20-30	11,8	25,0	19,21	80,66	84,54	13,90	8,4	24,6	
5	30-40	5,0	35,0	8,18	88,84	92,49	7,96	4,8	34,5	
6	40-50	3,6	45,0	5,85	94,69	96,77	4,27	2,6	44,4	
7	50-60	1,7	55,0	2,83	97,52	98,83	2,07	1,3	54,3	
8	60-70	0,7	65,0	1,17	98,69	99,68	0,85	0,5	64,2	
9	70-80	0,6	75,0	0,90	99,60	99,95	0,27	0,2	73,9	
10	80-90	0,1	85,0	0,16	99,76	100,00	0,05	0,0	83,3	
11	90-100	0,2	95,0	0,24	100,00	100,00	0,00	0,0	91,8	
	100	0,0	100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	11,6	0,2			0,2	100,00	9,3	
				0,1						

A-V.1.16 - Cal 01 - Concentrado Scavenger - Fração -74+44 μ m

Ensaio	Cal 01	Conc Scavenger		Fração -74 +44 μm					
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	65,2	0,0	-	-	-	-	65,6	0,00
2	0-10	14,3	5,0	41,04	41,04	41,27	41,27	14,2	4,3
3	10-20	7,2	15,0	20,73	61,77	64,71	23,44	8,1	14,6
4	20-30	6,3	25,0	17,99	79,76	79,74	15,03	5,2	24,6
5	30-40	3,1	35,0	8,89	88,66	89,18	9,44	3,2	34,6
6	40-50	2,2	45,0	6,43	95,08	94,79	5,61	1,9	44,5
7	50-60	1,0	55,0	2,84	97,93	97,85	3,06	1,1	54,4
8	60-70	0,3	65,0	0,91	98,84	99,31	1,46	0,5	64,3
9	70-80	0,2	75,0	0,71	99,55	99,86	0,55	0,2	74,1
10	80-90	0,1	85,0	0,29	99,84	99,99	0,13	0,0	83,5
11	90-100	0,1	95,0	0,16	100,00	100,00	0,01	0,0	92,0
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	6,5	0,2			0,2	100,00	6,1
				0,1			0,1		
							Gama	0,70	

Ajuste com a curva beta					
a	0,84	a ini	0,93	Dens cpy	4,3
b	3,88	b ini	4,01	Dens amostra	3,0
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	41,04	41,27	0,05	0,01
3	10-20	61,77	64,71	8,65	0,70
4	20-30	79,76	79,74	0,00	1,21
5	30-40	88,66	89,18	0,27	0,02
6	40-50	95,08	94,79	0,08	0,10
7	50-60	97,93	97,85	0,01	0,00
8	60-70	98,84	99,31	0,22	0,03
9	70-80	99,55	99,86	0,10	0,00
10	80-90	99,84	99,99	0,02	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		1,63	S2 S1 =	0,94	0,21
ζ		15	ζ S3 =		0,27
η		1	η S4 =	0,21	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	65,2	0,0	0,0	3,0	65,64	0,0
2	5,0	3,0	14,3	7,1	4,3	3,0	14,18	6,1
3	15,0	3,2	7,2	20,4	14,6	3,2	8,05	19,9
4	25,0	3,3	6,3	32,6	24,6	3,3	5,16	32,2
5	35,0	3,4	3,1	43,9	34,6	3,4	3,24	43,5
6	45,0	3,6	2,2	54,3	44,5	3,6	1,93	53,9
7	55,0	3,7	1,0	64,0	54,4	3,7	1,05	63,5
8	65,0	3,8	0,3	73,0	64,3	3,8	0,50	72,4
9	75,0	4,0	0,2	81,4	74,1	4,0	0,2	80,6
10	85,0	4,1	0,1	89,2	83,5	4,1	0,0	88,0
11	95,0	4,2	0,1	96,5	92,0	4,2	0,0	94,4
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 2,9	teor metálico (%) = 2,66	teor metálico (%) = 2,7
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 6,5	teor vol. Balanço fração = 5,4	teor volumétrico beta = 6,1
teor mineral % = 8,3	teor cpy balanço fração % = 7,7	teor mineral (%) = 7,8

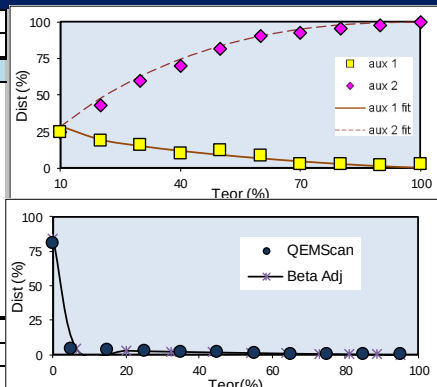
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.17 - Cal 01 - Concentrado Scavenger - Fração -44+20 μ m

Ensaio	Cal 01	Conc Scavenger		Fração -44 +20 μm					
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	80,9	0,0	-	-	-	-	83,8	0,00
2	0-10	4,71	5,0	24,64	24,64	28,43	28,43	4,6	4,4
3	10-20	3,55	15,0	18,54	43,18	47,77	19,34	3,1	14,8
4	20-30	3,11	25,0	16,28	59,46	62,84	15,07	2,4	24,8
5	30-40	1,95	35,0	10,18	69,64	74,65	11,81	1,9	34,8
6	40-50	2,35	45,0	12,26	81,90	83,74	9,09	1,5	44,8
7	50-60	1,62	55,0	8,46	90,36	90,49	6,75	1,1	54,7
8	60-70	0,48	65,0	2,53	92,89	95,20	4,71	0,8	64,7
9	70-80	0,50	75,0	2,64	95,52	98,16	2,95	0,5	74,5
10	80-90	0,34	85,0	1,80	97,33	99,64	1,48	0,2	84,3
11	90-100	0,51	95,0	2,67	100,00	100,00	0,36	0,1	93,0
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	5,6	0,3			0,3	100,00	4,3
				0,1					
								Gama	3,64

Ajuste com a curva beta					
a	0,84	a ini	0,85	Dens cpy	4,30
b	2,33	b ini	2,04	Dens amostra	3,0
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	24,64	28,43	14,38	0,01
3	10-20	43,18	47,77	21,08	0,17
4	20-30	59,46	62,84	11,44	0,45
5	30-40	69,64	74,65	25,08	0,00
6	40-50	81,90	83,74	3,40	0,76
7	50-60	90,36	90,49	0,02	0,28
8	60-70	92,89	95,20	5,38	0,08
9	70-80	95,52	98,16	6,94	0,00
10	80-90	97,33	99,64	5,34	0,01
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,21
Objetivo		33,41	S2 S1 =	9,31	0,20
$\zeta =$		50	ζ S3 =		6,62
$\eta =$		2	η S4 =	17,29	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	80,9	0,0	0,0	2,9	83,81	0,0
2	5,0	3,0	4,7	7,1	4,4	3,0	4,6	6,4
3	15,0	3,1	3,5	20,5	14,8	3,1	3,1	20,2
4	25,0	3,3	3,1	32,7	24,8	3,3	2,4	32,5
5	35,0	3,4	1,9	44,0	34,8	3,4	1,9	43,8
6	45,0	3,6	2,3	54,4	44,8	3,6	1,5	54,2
7	55,0	3,7	1,6	64,1	54,7	3,7	1,09	63,8
8	65,0	3,8	0,5	73,1	64,7	3,8	0,76	72,8
9	75,0	4,0	0,5	81,4	74,5	4,0	0,48	81,1
10	85,0	4,1	0,3	89,2	84,3	4,1	0,24	88,7
11	95,0	4,2	0,5	96,5	93,0	4,2	0,06	95,1
	100,0	4,3			100,0	4,3		100,0
			100,0					
				100,0				

Antes do ajuste beta	dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) =	2,4	teor metálico (%) =	1,70
densidade outros minerais =	2,9	val.metal / val.mineral =	0,35
teor volumétrico =	5,6	teor vol. Balanço fração	3,4
teor mineral % =	6,8	teor cpy balanço fração % =	4,9
		teor metálico (%) =	1,8
		densidade outros minerais =	2,9
		teor volumétrico beta =	4,3
		teor mineral (%) =	5,3

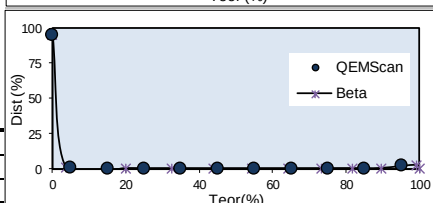
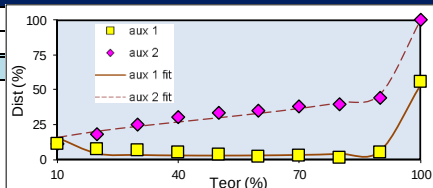
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.18 - Cal 01 - Concentrado Scavenger - Fração -20 μ m

Ensaio	Cal 01	Conc Scavenger		Fração -20 μm									
Dados de entrada e funções auxiliares													
bin		mass%		aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)				
1	0	95,0	0,0	-	-	-	-	95,2	0,00				
2	0-10	0,55	5,0	11,13	11,13	15,93	15,93	0,8	2,5				
3	10-20	0,35	15,0	7,15	18,28	20,41	4,47	0,2	14,7				
4	20-30	0,34	25,0	6,89	25,17	23,88	3,48	0,2	24,9				
5	30-40	0,25	35,0	5,05	30,22	27,00	3,12	0,1	34,9				
6	40-50	0,15	45,0	3,09	33,31	30,04	3,03	0,1	45,0				
7	50-60	0,08	55,0	1,58	34,89	33,18	3,14	0,1	55,1				
8	60-70	0,14	65,0	2,86	37,75	36,67	3,49	0,2	65,1				
9	70-80	0,08	75,0	1,53	39,28	40,91	4,24	0,2	75,2				
10	80-90	0,24	85,0	4,85	44,14	47,05	6,14	0,3	85,4				
11	90-100	2,77	95,0	55,86	100,00	100,00	52,95	2,5	98,7				
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00				
TOTAL		100,0	3,4	0,7			0,7	100,00	3,3				
				0,6									
							Gama	0,21					

Ajuste com a curva beta					
a	0,32	a ini	0,49	Dens cpy	4,3
b	0,14	b ini	0,24	Dens amostra	3,0
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	11,13	15,93	23,09	0,04
3	10-20	18,28	20,41	4,53	0,02
4	20-30	25,17	23,88	1,65	0,03
5	30-40	30,22	27,00	10,37	0,01
6	40-50	33,31	30,04	10,72	0,00
7	50-60	34,89	33,18	2,93	0,01
8	60-70	37,75	36,67	1,17	0,00
9	70-80	39,28	40,91	2,65	0,02
10	80-90	44,14	47,05	8,51	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,06
Objetivo		6,58	S2 S1 =	6,56	0,02
$\zeta =$		1	ζ S3 =		0,00
$\eta =$			η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	95,0	0,0	0,0	2,9	95,24	0,0
2	5,0	3,0	0,6	7,2	2,5	3,0	0,76	3,6
3	15,0	3,1	0,4	20,5	14,7	3,1	0,21	20,1
4	25,0	3,3	0,3	32,8	24,9	3,3	0,17	32,6
5	35,0	3,4	0,3	44,1	34,9	3,4	0,15	44,0
6	45,0	3,6	0,2	54,5	45,0	3,6	0,14	54,5
7	55,0	3,7	0,1	64,1	55,1	3,7	0,15	64,2
8	65,0	3,8	0,1	73,1	65,1	3,8	0,17	73,2
9	75,0	4,0	0,1	81,4	75,2	4,0	0,20	81,6
10	85,0	4,1	0,2	89,2	85,4	4,1	0,29	89,6
11	95,0	4,2	2,8	96,5	98,7	4,3	2,52	99,1
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0					

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	1,2	teor metálico (%) =	1,18	teor metálico (%) =	1,2
densidade outros minerais =	2,9	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,9
teor volumétrico =	3,4	teor vol. Balanço fração	2,3	teor volumétrico beta =	3,3
teor mineral % =	3,5	teor cpy balanço fração % =	3,4	teor mineral (%) =	3,4

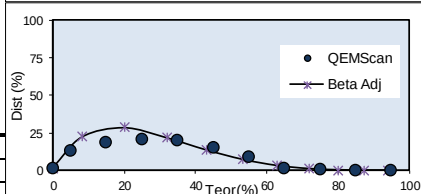
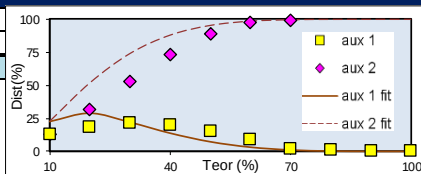
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.19 - Cal 01- Concentrado Cleaner- Fração +212 μm

Ensaio	Cal 01	Conc Cleaner	Fração +212 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _{m mista,j}	Dist auxiliar sem ganga	Dist auxiliar acumulada calculada	Dist auxiliar simples calculada	Dist simples calculada	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
					a - F _m	beta- F _m	beta- f _{m mista}	beta- f _{m beta,j}		
					mista,j	mista beta,j	beta,j			
1	0	1,0	0,0	-	-	-	-	1,5	0,00	
2	0-10	13,1	5,0	13,23	13,23	22,77	22,77	22,4	5,9	
3	10-20	18,4	15,0	18,54	31,77	51,90	29,13	28,7	14,9	
4	20-30	20,9	25,0	21,14	52,91	74,15	22,25	21,9	24,7	
5	30-40	20,1	35,0	20,31	73,21	88,07	13,91	13,7	34,5	
6	40-50	15,2	45,0	15,38	88,60	95,42	7,35	7,2	44,4	
7	50-60	8,9	55,0	9,01	97,61	98,63	3,21	3,2	54,2	
8	60-70	1,5	65,0	1,55	99,15	99,72	1,09	1,1	64,0	
9	70-80	0,8	75,0	0,85	100,00	99,97	0,25	0,2	73,6	
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,03	0,0	82,8	
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	91,5	
			100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	29,1	0,3				0,2	100,00	21,5
				0,1				0,1		
							Gama	52,98		

Ajuste com a curva beta					
a	1,63	aini	2,04	Dens cpy	4,30
b	5,81	bini	4,90	Dens amostra	3,3
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	13,23	22,77	90,93	86,86
3	10-20	31,77	51,90	405,16	106,76
4	20-30	52,91	74,15	451,47	0,98
5	30-40	73,21	88,07	220,56	41,04
6	40-50	88,60	95,42	46,50	63,85
7	50-60	97,61	98,63	1,05	33,11
8	60-70	99,15	99,72	0,32	0,21
9	70-80	100,00	99,97	0,00	0,35
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		158,26	S2 S1 =	121,60	33,32
$\zeta =$		15	ζ S3 =		0,54
$\eta =$		10	η S4 =	2,81	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	3,0	1,53	0,0
2	5,0	3,1	13,1	7,0	5,9	3,1	22,4	8,2
3	15,0	3,2	18,4	20,2	14,9	3,2	28,7	20,0
4	25,0	3,3	20,9	32,3	24,7	3,3	21,9	31,9
5	35,0	3,5	20,1	43,5	34,5	3,5	13,7	43,0
6	45,0	3,6	15,2	54,0	44,4	3,6	7,2	53,3
7	55,0	3,7	8,9	63,6	54,2	3,7	3,2	62,9
8	65,0	3,8	1,5	72,7	64,0	3,8	1,1	71,8
9	75,0	4,0	0,8	81,1	73,6	4,0	0,2	79,9
10	85,0	4,1	0,0	89,0	82,8	4,1	0,0	87,3
11	95,0	4,2	0,0	96,5	91,5	4,2	0,0	93,9
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0	35,82				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	12,4	teor metálico (%) =	9,39	teor metálico (%) =	9,5
densidade outros minerais =	3,0	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	29,1	teor vol. Balanço fração =	20,6	teor volumétrico beta =	21,5
teor mineral % =	35,8	teor cpy balanço fração % =	27,1	teor mineral (%) =	27,3

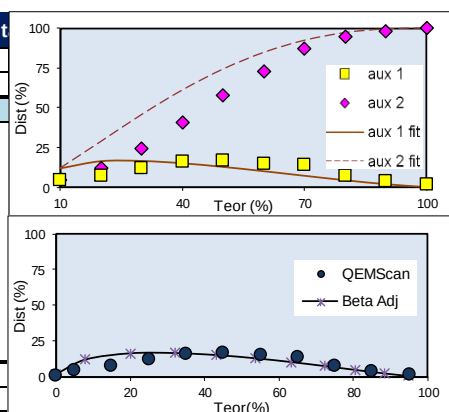
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.20 - Cal 01- Concentrado Cleaner- Fração -212 +150 μ m

Ensaio	Cal 01	Conc Cleaner		Fração -212 +150 μm						
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	1,0	0,0	-	-	-	-	1,9	0,00	
2	0-10	4,6	5,0	4,61	4,61	12,27	12,27	12,0	5,7	
3	10-20	7,4	15,0	7,43	12,04	28,99	16,72	16,4	15,1	
4	20-30	12,3	25,0	12,41	24,45	45,82	16,83	16,5	25,0	
5	30-40	16,4	35,0	16,52	40,97	61,20	15,39	15,1	34,9	
6	40-50	16,5	45,0	16,70	57,67	74,33	13,13	12,9	44,8	
7	50-60	15,1	55,0	15,21	72,88	84,77	10,44	10,2	54,8	
8	60-70	13,8	65,0	13,98	86,86	92,36	7,59	7,4	64,7	
9	70-80	7,3	75,0	7,42	94,28	97,16	4,80	4,7	74,5	
10	80-90	3,8	85,0	3,84	98,12	99,49	2,33	2,3	84,2	
11	90-100	1,9	95,0	1,88	100,00	100,00	0,51	0,5	92,9	
TOTAL			100,0	45,3	0,5		0,4	100,00	34,6	
				0,3			0,2			

Ajuste com a curva bet					
a	1,38	a ini	2,06	Dens cpy	4,30
b	2,52	b ini	2,43	Dens amostra	3,4
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	4,61	12,27	58,65	55,79
3	10-20	12,04	28,99	287,14	81,75
4	20-30	24,45	45,82	456,56	17,86
5	30-40	40,97	61,20	409,28	1,59
6	40-50	57,67	74,33	277,59	13,32
7	50-60	72,88	84,77	141,23	23,23
8	60-70	86,86	92,36	30,19	40,84
9	70-80	94,28	97,16	8,27	6,94
10	80-90	98,12	99,49	1,88	2,28
11	90-100	100,00	100,00	0,00	1,86
Objetivo		211,91	S2 S1 =	167,08	24,55
$\zeta =$		20	ζ S3 =		13,94
$\eta =$		8	η S4 =	6,35	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	3,0	1,9	0,0
2	5,0	3,1	4,6	6,9	5,7	3,1	12,0	7,9
3	15,0	3,2	7,4	20,0	15,1	3,2	16,4	20,1
4	25,0	3,3	12,3	32,1	25,0	3,3	16,5	32,1
5	35,0	3,5	16,4	43,3	34,9	3,5	15,1	43,2
6	45,0	3,6	16,5	53,7	44,8	3,6	12,9	53,6
7	55,0	3,7	15,1	63,4	54,8	3,7	10,2	63,2
8	65,0	3,9	13,8	72,5	64,7	3,9	7,44	72,2
9	75,0	4,0	7,3	81,0	74,5	4,0	4,71	80,6
10	85,0	4,1	3,8	88,9	84,2	4,1	2,29	88,3
11	95,0	4,2	1,9	96,4	92,9	4,2	0,50	94,9
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 18,1	teor metálico (%) = 13,92	teor metálico (%) = 14,2
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 45,3	teor vol. Balanço fração = 32,2	teor volumétrico beta = 34,6
teor mineral % = 52,4	teor cpy balanço fração % = 40,2	teor mineral (%) = 41,1

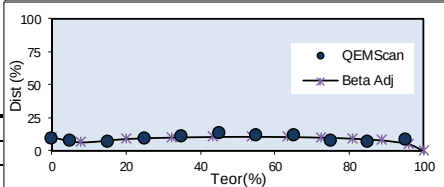
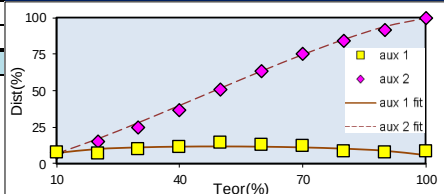
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)- Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.21 - Cal 01- Concentrado Cleaner- Fração -150 +74 μm

Ensaio	Cal 01	Conc Cleaner	Fração -150 +74 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	9,1	0,0	-	-	-	-	10,3	0,00	
2	0-10	7,3	5,0	8,06	8,06	7,23	7,23	6,5	5,6	
3	10-20	6,4	15,0	7,06	15,12	17,31	10,08	9,0	15,1	
4	20-30	8,8	25,0	9,65	24,77	28,51	11,20	10,1	25,1	
5	30-40	10,5	35,0	11,58	36,36	40,25	11,74	10,5	35,0	
6	40-50	12,8	45,0	14,12	50,48	52,13	11,88	10,7	45,0	
7	50-60	11,6	55,0	12,80	63,29	63,84	11,71	10,5	55,0	
8	60-70	11,1	65,0	12,25	75,54	75,05	11,21	10,1	64,9	
9	70-80	7,5	75,0	8,28	83,82	85,37	10,32	9,3	74,9	
10	80-90	6,8	85,0	7,50	91,32	94,22	8,85	7,9	84,8	
11	90-100	7,9	95,0	8,68	100,00	100,00	5,78	5,2	94,2	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	45,6	0,5			0,5	100,00	43,6	
				0,3			0,3			
							Gamma	12,98		

Ajuste com a curva beta					
a	1,29	a ini	1,32	Dens cpy	4,30
b	1,37	b ini	1,31	Dens amostra	3,6
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	8,06	7,23	0,69	0,71
3	10-20	15,12	17,31	4,78	6,87
4	20-30	24,77	28,51	13,95	1,63
5	30-40	36,36	40,25	15,12	0,00
6	40-50	50,48	52,13	2,72	4,74
7	50-60	63,29	63,84	0,30	1,29
8	60-70	75,54	75,05	0,24	1,17
9	70-80	83,82	85,37	2,41	3,01
10	80-90	91,32	94,22	8,39	1,25
11	90-100	100,00	100,00	0,00	7,30
Objetivo		9,36	S2 S1 =	4,86	2,80
$\zeta =$		15	ζ S3 =		0,31
$\eta =$		1	η S4 =	1,39	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	9,1	0,0	0,0	3,0	10,28	0,0
2	5,0	3,1	7,3	6,9	5,6	3,1	6,5	7,8
3	15,0	3,2	6,4	20,0	15,1	3,2	9,0	20,1
4	25,0	3,4	8,8	32,1	25,1	3,4	10,1	32,1
5	35,0	3,5	10,5	43,2	35,0	3,5	10,5	43,3
6	45,0	3,6	12,8	53,7	45,0	3,6	10,7	53,7
7	55,0	3,7	11,6	63,4	55,0	3,7	10,50	63,3
8	65,0	3,9	11,1	72,4	64,9	3,9	10,06	72,4
9	75,0	4,0	7,5	80,9	74,9	4,0	9,26	80,9
10	85,0	4,1	6,8	88,9	84,8	4,1	7,94	88,8
11	95,0	4,2	7,9	96,4	94,2	4,2	5,19	95,9
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,00	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 17,7	teor metálico (%) = 17,00	teor metálico (%) = 17,0
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 45,6	teor vol. Balanço fração = 40,6	teor volumétrico beta = 43,6
teor mineral % = 51,3	teor cpy balanço fração % = 49,1	teor mineral (%) = 49,3

Nilce Alves dos Santos

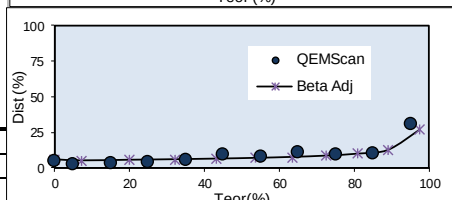
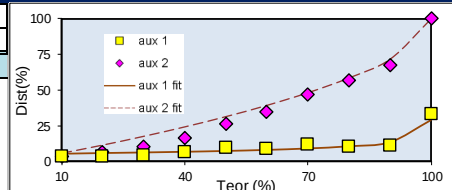
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.22 - Cal 01- Concentrado Cleaner- Fração -74 +44 μm

Ensaio	Cal 01	Conc Cleaner	Fração -74 +44 μm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)		
1	0	5,04	0,0	-	-	-	-	-	5,7	0,00		
2	0-10	2,87	5,0	3,03	3,03	5,28	5,28	5,0	5,1			
3	10-20	2,98	15,0	3,14	6,16	11,03	5,75	5,4	15,1			
4	20-30	3,92	25,0	4,13	10,30	17,20	6,17	5,8	25,1			
5	30-40	5,83	35,0	6,14	16,43	23,83	6,64	6,3	35,1			
6	40-50	9,27	45,0	9,76	26,19	31,03	7,20	6,8	45,1			
7	50-60	8,04	55,0	8,47	34,65	38,96	7,92	7,5	55,1			
8	60-70	11,2	65,0	11,83	46,49	47,87	8,91	8,4	65,1			
9	70-80	9,60	75,0	10,11	56,60	58,29	10,42	9,8	75,2			
10	80-90	10,1	85,0	10,66	67,26	71,54	13,25	12,5	85,3			
11	90-100	31,1	95,0	32,74	100,00	100,00	28,46	26,8	96,4			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	64,8	0,7			0,6	100,00	61,3			
				0,5			0,5					

Gama 13,85

Ajuste com a curva beta					
a	1,03	a ini	1,45	Dens cpy	4,3
b	0,55	b ini	0,67	Dens amostra	3,8
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	3,03	5,28	5,07	4,42
3	10-20	6,16	11,03	23,66	5,96
4	20-30	10,30	17,20	47,62	3,58
5	30-40	16,43	23,83	54,78	0,18
6	40-50	26,19	31,03	23,47	6,14
7	50-60	34,65	38,96	18,50	0,33
8	60-70	46,49	47,87	1,91	8,04
9	70-80	56,60	58,29	2,86	0,05
10	80-90	67,26	71,54	18,29	5,58
11	90-100	100,00	100,00	0,00	18,15
Objetivo		29,94	S2 S1 =	19,62	5,24
$\zeta =$		10	ζ S3 =		2,64
$\eta =$		5	η S4 =	2,43	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	5,0	0,0	0,0	3,0	5,74	0,0
2	5,0	3,1	2,9	6,9	5,1	3,1	4,97	7,1
3	15,0	3,2	3,0	20,0	15,1	3,2	5,42	20,0
4	25,0	3,4	3,9	32,0	25,1	3,4	5,81	32,1
5	35,0	3,5	5,8	43,2	35,1	3,5	6,26	43,3
6	45,0	3,6	9,3	53,6	45,1	3,6	6,79	53,7
7	55,0	3,7	8,0	63,3	55,1	3,7	7,47	63,4
8	65,0	3,9	11,2	72,4	65,1	3,9	8,40	72,5
9	75,0	4,0	9,6	80,9	75,2	4,0	9,8	81,0
10	85,0	4,1	10,1	88,9	85,3	4,1	12,5	89,1
11	95,0	4,2	31,1	96,4	96,4	4,3	26,8	97,5
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	24,0	teor metálico (%) =	22,56	teor metálico (%) =	22,7
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	64,8	teor vol. Balanço fração =	57,0	teor volumétrico beta =	61,3
teor mineral % =	69,5	teor cpy balanço fração % =	65,2	teor mineral (%) =	65,7

Nilce Alves dos Santos

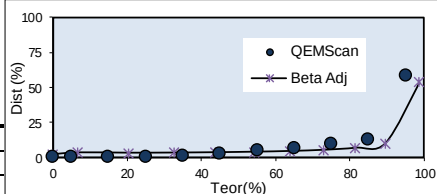
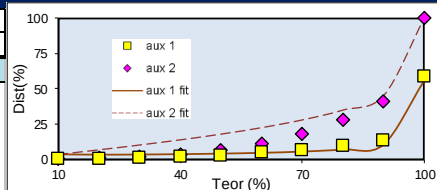
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.23 - Cal 01- Concentrado Cleaner- Fração -44 +20 μm

Ensaio	Cal 01	Conc Cleaner	Fração -44 +20 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	0,69	0,0	-	-	-	-	2,2	0,00	
2	0-10	0,22	5,0	0,23	0,23	3,54	3,54	3,5	4,8	
3	10-20	0,62	15,0	0,62	0,85	6,82	3,28	3,2	15,0	
4	20-30	0,90	25,0	0,91	1,75	10,22	3,40	3,3	25,0	
5	30-40	1,67	35,0	1,68	3,44	13,87	3,65	3,6	35,1	
6	40-50	2,82	45,0	2,84	6,28	17,89	4,03	3,9	45,1	
7	50-60	5,14	55,0	5,18	11,46	22,48	4,59	4,5	55,1	
8	60-70	6,48	65,0	6,52	17,98	27,94	5,45	5,3	65,2	
9	70-80	9,70	75,0	9,76	27,75	34,89	6,95	6,8	75,2	
10	80-90	13,2	85,0	13,28	41,03	45,15	10,26	10,0	85,4	
11	90-100	58,6	95,0	58,97	100,00	100,00	54,85	53,6	98,0	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	83,3	0,8			0,8	100,00	76,7	
				0,7			0,7			

Gama 219,28

Ajuste com a curva beta					
a	0,89	a ini	2,87	Dens cpy	4,30
b	0,24	b ini	0,55	Dens amostra	3,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	0,23	3,54	10,96	10,46
3	10-20	0,85	6,82	35,63	6,71
4	20-30	1,75	10,22	71,62	5,88
5	30-40	3,44	13,87	108,76	3,60
6	40-50	6,28	17,89	134,88	1,25
7	50-60	11,46	22,48	121,46	0,43
8	60-70	17,98	27,94	99,05	1,31
9	70-80	27,75	34,89	51,03	8,38
10	80-90	41,03	45,15	16,98	9,96
11	90-100	100,00	100,00	0,00	24,20
Objetivo		92,82	S2 S1 =	65,04	7,22
$\zeta =$		10	ζ S3 =		9,20
$\eta =$		5	η S4 =	11,37	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	0,7	0,0	0,0	3,0	2,20	0,0
2	5,0	3,0	0,2	7,1	4,8	3,0	3,46	6,8
3	15,0	3,2	0,6	20,3	15,0	3,2	3,21	20,3
4	25,0	3,3	0,9	32,5	25,0	3,3	3,33	32,6
5	35,0	3,4	1,7	43,8	35,1	3,4	3,57	43,9
6	45,0	3,6	2,8	54,2	45,1	3,6	3,94	54,3
7	55,0	3,7	5,1	63,9	55,1	3,7	4,49	64,0
8	65,0	3,8	6,5	72,9	65,2	3,8	5,33	73,0
9	75,0	4,0	9,7	81,3	75,2	4,0	6,80	81,5
10	85,0	4,1	13,2	89,1	85,4	4,1	10,0	89,4
11	95,0	4,2	58,6	96,5	98,0	4,3	53,6	98,6
	100,0	4,3			100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 30,0	teor metálico (%) = 27,30	teor metálico (%) = 27,6
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 83,3	teor vol. Balanço fração = 72,1	teor volumétrico beta = 76,7
teor mineral % = 86,8	teor cpy balanço fração % = 78,9	teor mineral (%) = 79,9

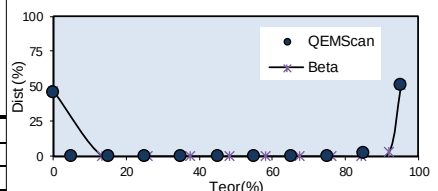
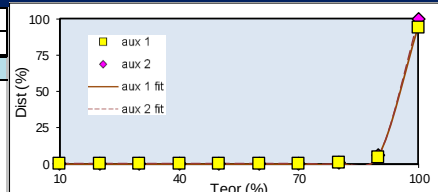
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.24 - Cal 01- Concentrado Cleaner- Fração -20 μ m

Ensaio	Cal 01	Conc Cleaner	Fração -20 μm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	46,0	0,0	-	-	-	-	46,4	0,00			
2	0-10	0,00	5,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	9,9			
3	10-20	0,00	15,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	19,9			
4	20-30	0,00	25,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	29,8			
5	30-40	0,00	35,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	39,8			
6	40-50	0,00	45,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	49,7			
7	50-60	0,00	55,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	59,6			
8	60-70	0,10	65,0	0,19	0,19	0,00	0,00	0,0	69,5			
9	70-80	0,44	75,0	0,82	1,01	0,00	0,00	0,0	79,4			
10	80-90	2,6	85,0	4,75	5,75	5,47	5,47	2,9	89,0			
11	90-100	50,9	95,0	94,25	100,00	100,00	94,53	50,7	93,4			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
	TOTAL	100,0	50,9	0,9			0,9	100,00	49,9			
				0,9			0,9					

Ajuste com a curva beta					
a	177,62	a ini	53,88	Dens cpy	4,3
b	13,09	b ini	3,25	Dens amostra	3,6
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	0,00	0,00	0,00	0,00
3	10-20	0,00	0,00	0,00	0,00
4	20-30	0,00	0,00	0,00	0,00
5	30-40	0,00	0,00	0,00	0,00
6	40-50	0,00	0,00	0,00	0,00
7	50-60	0,00	0,00	0,00	0,00
8	60-70	0,19	0,00	0,04	0,01
9	70-80	1,01	0,00	1,01	0,19
10	80-90	5,75	5,47	0,08	0,14
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,03
Objetivo		0,15	S2 S1 =	0,11	0,04
$\zeta =$		3	ζ S3 =		0,00
$\eta =$			η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe							
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	46,0	0,0	0,0	3,0	46,38
2	5,0	3,1	0,0	6,9	9,9	3,2	0,00
3	15,0	3,2	0,0	19,9	19,9	3,3	0,00
4	25,0	3,4	0,0	32,0	29,8	3,4	0,00
5	35,0	3,5	0,0	43,2	39,8	3,5	0,00
6	45,0	3,6	0,0	53,6	49,7	3,7	0,00
7	55,0	3,7	0,0	63,3	59,6	3,8	0,00
8	65,0	3,9	0,1	72,4	69,5	3,9	0,00
9	75,0	4,0	0,4	80,9	79,4	4,0	0,00
10	85,0	4,1	2,6	88,9	89,0	4,2	2,93
11	95,0	4,2	50,9	96,4	93,4	4,2	50,69
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0
100,0				100,0			

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	17,9	teor metálico (%) =	17,63	teor metálico (%) =	17,6
densidade outros minerais =	3,0	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	50,9	teor vol. Balanço fração	42,4	teor volumétrico beta =	49,9
teor mineral % =	51,7	teor cpy balanço fração % =	50,9	teor mineral (%) =	51,0

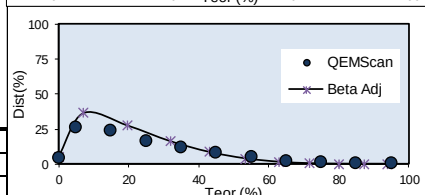
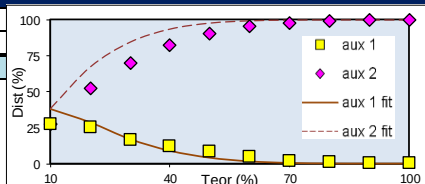
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.25 - Cal 01 - Rejeito Cleaner - Fração +212 μm

Ensaio Cal 01		Rej Cleaner		Fração +212 µm									
Dados de entrada e funções auxiliares													
bin		mass%		aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _{mista,j}	Dist auxiliar sem ganga acumulad a - F _m	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)				
1	0	4,1	0,0	-	-	-	-	5,1	0,00				
2	0-10	26,4	5,0	27,48	27,48	38,39	38,39	36,4	5,0				
3	10-20	24,2	15,0	25,26	52,73	67,38	28,98	27,5	14,6				
4	20-30	16,2	25,0	16,92	69,66	84,62	17,24	16,4	24,5				
5	30-40	12,0	35,0	12,53	82,19	93,66	9,05	8,6	34,4				
6	40-50	8,2	45,0	8,58	90,77	97,81	4,15	3,9	44,3				
7	50-60	4,8	55,0	5,01	95,78	99,41	1,60	1,5	54,1				
8	60-70	2,0	65,0	2,05	97,83	99,89	0,48	0,5	63,9				
9	70-80	1,2	75,0	1,26	99,09	99,99	0,10	0,1	73,5				
10	80-90	0,6	85,0	0,62	99,71	100,00	0,01	0,0	82,7				
11	90-100	0,3	95,0	0,29	100,00	100,00	0,00	0,0	91,4				
			100,0	-	-	-	-	0,0	100,00				
TOTAL		100,0	22,5	0,2				0,2	100,00	15,8			
				0,1				0,0					
								Gama	24,35				

Ajuste com a curva beta					
a	1,20	aini	1,06	Dens cpy	4,30
b	6,01	bini	3,46	Dens amostra	3,2
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	27,48	38,39	119,17	101,72
3	10-20	52,73	67,38	214,45	10,80
4	20-30	69,66	84,62	223,83	0,02
5	30-40	82,19	93,66	131,65	11,80
6	40-50	90,77	97,81	49,57	18,43
7	50-60	95,78	99,41	13,21	10,77
8	60-70	97,83	99,89	4,25	2,29
9	70-80	99,09	99,99	0,81	1,25
10	80-90	99,71	100,00	0,09	0,34
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,08
Objetivo		98,73	S2 S1 =	75,70	15,75
$\zeta =$		10	ζ S3 =	2,30	
$\eta =$		5	η S4 =	4,98	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	4,1	0,0	0,0	3,0	5,1	0,0
2	5,0	3,1	26,4	7,0	5,0	3,1	36,4	7,1
3	15,0	3,2	24,2	20,3	14,6	3,2	27,5	19,8
4	25,0	3,3	16,2	32,4	24,5	3,3	16,4	31,9
5	35,0	3,4	12,0	43,7	34,4	3,4	8,6	43,0
6	45,0	3,6	8,2	54,1	44,3	3,6	3,9	53,4
7	55,0	3,7	4,8	63,8	54,1	3,7	1,5	62,9
8	65,0	3,8	2,0	72,8	63,9	3,8	0,5	71,8
9	75,0	4,0	1,2	81,2	73,5	4,0	0,1	80,0
10	85,0	4,1	0,6	89,1	82,7	4,1	0,0	87,3
11	95,0	4,2	0,3	96,5	91,4	4,2	0,0	93,9
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	9,7	teor metálico (%) =	6,89	teor metálico (%) =	7,1
densidade outros minerais =	3,0	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	22,5	teor vol. Balanço fração =	14,7	teor volumétrico beta =	15,8
teor mineral % =	28,0	teor cpy balanço fração % =	19,9	teor mineral (%) =	20,4

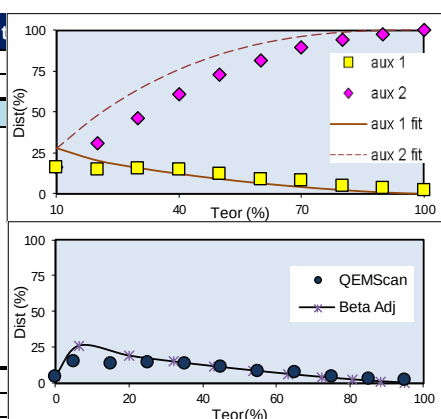
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.26 - Cal 01 - Rejeito Cleaner - Fração -212 +150 μ m

Ensaio	Cal 01	Rej Cleaner	Fração -212 +150 μm								
Dados de entrada e funções auxiliares											
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,beta,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)		
1	0	4,4	0,0	-	-	-	-	5,0	0,00		
2	0-10	15,3	5,0	16,00	16,00	27,60	27,60	26,2	4,6		
3	10-20	14,1	15,0	14,75	30,75	47,82	20,21	19,2	14,8		
4	20-30	14,7	25,0	15,40	46,15	63,63	15,81	15,0	24,8		
5	30-40	14,0	35,0	14,61	60,77	75,87	12,24	11,6	34,8		
6	40-50	11,5	45,0	12,00	72,76	85,08	9,20	8,7	44,7		
7	50-60	8,7	55,0	9,07	81,84	91,67	6,60	6,3	54,7		
8	60-70	7,7	65,0	8,01	89,85	96,06	4,39	4,2	64,6		
9	70-80	4,4	75,0	4,58	94,43	98,62	2,56	2,4	74,5		
10	80-90	3,3	85,0	3,45	97,88	99,77	1,15	1,1	84,1		
11	90-100	2,0	95,0	2,12	100,00	100,00	0,23	0,2	92,8		
			100,0	-	-	-	-		100,00		
TOTAL		100,0	34,4	0,4			0,3	100,00	24,8		
				0,2			0,1				

Ajuste com a curva beta					
a	0,91	a ini	1,08	Dens cpy	4,30
b	2,57	b ini	1,93	Dens amostra	3,3
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	16,00	27,60	134,56	119,16
3	10-20	30,75	47,82	291,29	26,01
4	20-30	46,15	63,63	305,45	0,09
5	30-40	60,77	75,87	228,17	5,50
6	40-50	72,76	85,08	151,60	7,44
7	50-60	81,84	91,67	96,75	5,80
8	60-70	89,85	96,06	38,54	12,22
9	70-80	94,43	98,62	17,54	3,79
10	80-90	97,88	99,77	3,57	4,86
11	90-100	100,00	100,00	0,00	3,27
Objetivo		163,56	S2 S1 =	126,75	18,81
$\zeta =$		15	ζ S3 =		14,81
$\eta =$		8	η S4 =	3,18	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	4,4	0,0	0,0	3,0	5,03	0,0
2	5,0	3,1	15,3	7,0	4,6	3,1	26,2	6,5
3	15,0	3,2	14,1	20,1	14,8	3,2	19,2	19,9
4	25,0	3,3	14,7	32,2	24,8	3,3	15,0	32,0
5	35,0	3,5	14,0	43,5	34,8	3,5	11,6	43,2
6	45,0	3,6	11,5	53,9	44,7	3,6	8,74	53,6
7	55,0	3,7	8,7	63,6	54,7	3,7	6,27	63,3
8	65,0	3,8	7,7	72,6	64,6	3,8	4,16	72,3
9	75,0	4,0	4,4	81,1	74,5	4,0	2,43	80,6
10	85,0	4,1	3,3	89,0	84,1	4,1	1,09	88,3
11	95,0	4,2	2,0	96,4	92,8	4,2	0,22	94,8
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	14,0	teor metálico (%) =	10,08	teor metálico (%) =	10,4
densidade outros minerais =	3,0	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	34,4	teor vol. Balanço fração =	22,4	teor volumétrico beta =	24,8
teor mineral % =	40,4	teor cpy balanço fração % =	29,1	teor mineral (%) =	30,1

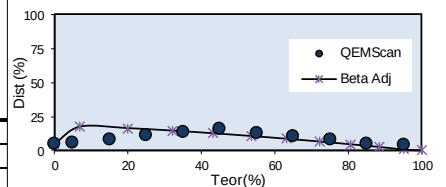
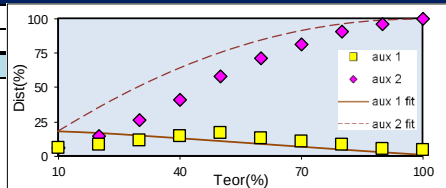
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.27 - Cal 01 - Rejeito Cleaner - Fração -150 +74 μm

Ensaio	Cal 01	Rej Cleaner	Fração -150 +74 μm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	4,7	0,0	-	-	-	-	5,1	0,00			
2	0-10	5,9	5,0	6,18	6,18	18,48	18,48	17,5	5,0			
3	10-20	8,0	15,0	8,35	14,52	35,73	17,24	16,4	14,9			
4	20-30	11,1	25,0	11,64	26,16	51,07	15,34	14,6	24,9			
5	30-40	13,8	35,0	14,45	40,61	64,36	13,29	12,6	34,9			
6	40-50	16,3	45,0	17,08	57,70	75,55	11,19	10,6	44,8			
7	50-60	12,6	55,0	13,23	70,92	84,61	9,06	8,6	54,8			
8	60-70	10,2	65,0	10,72	81,65	91,53	6,93	6,6	64,7			
9	70-80	8,3	75,0	8,75	90,40	96,36	4,83	4,6	74,6			
10	80-90	5,2	85,0	5,41	95,80	99,14	2,78	2,6	84,4			
11	90-100	4,0	95,0	4,20	100,00	100,00	0,86	0,8	93,2			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	44,4	0,5			0,3	100,00	31,5			
				0,3			0,2					
							Gamma	8,66				

Ajuste com a curva beta					
a	1,04	a ini	1,61	Dens cpy	4,30
b	2,09	b ini	1,84	Dens amostra	3,4
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	6,18	18,48	151,39	135,82
3	10-20	14,52	35,73	449,54	70,77
4	20-30	26,16	51,07	620,48	12,05
5	30-40	40,61	64,36	564,18	1,34
6	40-50	57,70	75,55	318,76	32,13
7	50-60	70,92	84,61	187,21	16,11
8	60-70	81,65	91,53	97,75	13,29
9	70-80	90,40	96,36	35,60	14,11
10	80-90	95,80	99,14	11,17	6,31
11	90-100	100,00	100,00	0,00	10,18
	Objetivo	291,40	S2 S1 =	243,61	31,21
	$\zeta =$	30	ζ S3 =		13,30
	$\eta =$	20	η S4 =	3,28	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	4,7	0,0	0,0	3,0	5,08	0,0
2	5,0	3,1	5,9	7,0	5,0	3,1	17,5	7,0
3	15,0	3,2	8,0	20,1	14,9	3,2	16,4	20,0
4	25,0	3,3	11,1	32,2	24,9	3,3	14,6	32,1
5	35,0	3,5	13,8	43,4	34,9	3,5	12,6	43,3
6	45,0	3,6	16,3	53,8	44,8	3,6	10,6	53,7
7	55,0	3,7	12,6	63,5	54,8	3,7	8,60	63,3
8	65,0	3,9	10,2	72,6	64,7	3,8	6,58	72,3
9	75,0	4,0	8,3	81,0	74,6	4,0	4,58	80,7
10	85,0	4,1	5,2	89,0	84,4	4,1	2,64	88,5
11	95,0	4,2	4,0	96,4	93,2	4,2	0,81	95,2
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,00	100,0
				100,0			100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	17,6	teor metálico (%) =	12,68	teor metálico (%) =	12,9
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	44,4	teor vol. Balanço fração	28,9	teor volumétrico beta =	31,5
teor mineral % =	50,9	teor cpy balanço fração % =	36,7	teor mineral (%) =	37,3

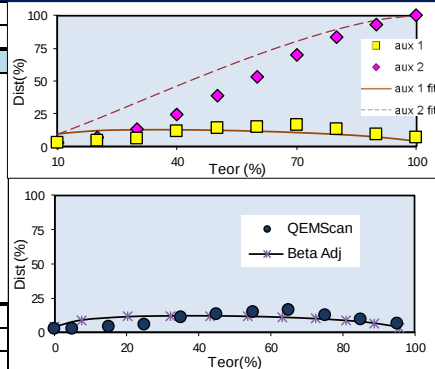
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.28 - Cal 01 - Rejeito Cleaner - Fração -74 +44 μm

Ensaio	Cal 01	Rej Cleaner	Fração -74 +44 μm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	2,4	0,0	-	-	-	-	4,1	0,00			
2	0-10	2,6	5,0	2,67	2,67	9,36	9,36	9,0	5,5			
3	10-20	4,3	15,0	4,43	7,10	21,20	11,85	11,4	15,1			
4	20-30	6,0	25,0	6,15	13,25	33,68	12,48	12,0	25,0			
5	30-40	11,2	35,0	11,52	24,77	46,18	12,50	12,0	35,0			
6	40-50	13,5	45,0	13,87	38,64	58,31	12,12	11,6	45,0			
7	50-60	14,5	55,0	14,90	53,55	69,73	11,42	10,9	54,9			
8	60-70	16,4	65,0	16,85	70,39	80,12	10,39	10,0	64,9			
9	70-80	12,7	75,0	13,05	83,44	89,11	8,99	8,6	74,8			
10	80-90	9,5	85,0	9,77	93,21	96,15	7,05	6,8	84,7			
11	90-100	6,6	95,0	6,79	100,00	100,00	3,85	3,7	94,0			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	54,9	0,6			0,4	100,00	42,7			
				0,4			0,3					
							Gama	72,94				

Ajuste com a curva beta					
a	1,23	a ini	2,12	Dens cpy	4,3
b	1,52	b ini	1,64	Dens amostra	3,5
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	2,67	9,36	44,66	40,44
3	10-20	7,10	21,20	198,79	49,45
4	20-30	13,25	33,68	417,40	35,54
5	30-40	24,77	46,18	458,65	0,55
6	40-50	38,64	58,31	386,78	3,68
7	50-60	53,55	69,73	261,84	12,97
8	60-70	70,39	80,12	94,60	42,02
9	70-80	83,44	89,11	32,05	17,01
10	80-90	93,21	96,15	8,64	7,73
11	90-100	100,00	100,00	0,00	8,62
Objetivo		246,90	S2 S1 =	190,34	21,80
$\zeta =$		15	ζ S3 =		19,49
$\eta =$		5	η S4 =	15,27	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	2,4	0,0	0,0	3,0	4,14	0,0
2	5,0	3,1	2,6	6,9	5,5	3,1	8,97	7,6
3	15,0	3,2	4,3	20,0	15,1	3,2	11,35	20,1
4	25,0	3,4	6,0	32,1	25,0	3,4	11,96	32,1
5	35,0	3,5	11,2	43,3	35,0	3,5	11,98	43,3
6	45,0	3,6	13,5	53,7	45,0	3,6	11,62	53,7
7	55,0	3,7	14,5	63,4	54,9	3,7	10,95	63,3
8	65,0	3,9	16,4	72,5	64,9	3,9	9,96	72,4
9	75,0	4,0	12,7	81,0	74,8	4,0	8,6	80,8
10	85,0	4,1	9,5	88,9	84,7	4,1	6,8	88,7
11	95,0	4,2	6,6	96,4	94,0	4,2	3,7	95,7
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	21,3	teor metálico (%) =	16,51	teor metálico (%) =	16,9
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	54,9	teor vol. Balanço fração =	39,2	teor volumétrico beta =	42,7
teor mineral % =	61,4	teor cpy balanço fração % =	47,7	teor mineral (%) =	48,8

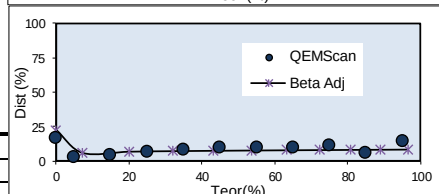
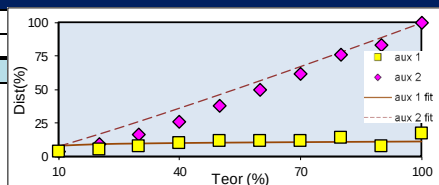
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.29 - Cal 01 - Rejeito Cleaner - Fração -44 +20 μm

Ensaio	Cal 01	Rej Cleaner	Fração -44 +20 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	16,7	0,0	-	-	-	-	22,6	0,00	
2	0-10	2,94	5,0	3,53	3,53	7,93	7,93	6,14	5,2	
3	10-20	4,42	15,0	5,31	8,84	16,99	9,06	7,02	15,1	
4	20-30	6,49	25,0	7,80	16,63	26,55	9,55	7,40	25,0	
5	30-40	8,01	35,0	9,62	26,25	36,43	9,88	7,65	35,0	
6	40-50	9,80	45,0	11,78	38,03	46,57	10,14	7,85	45,0	
7	50-60	9,91	55,0	11,90	49,93	56,92	10,35	8,02	55,0	
8	60-70	9,91	65,0	11,90	61,83	67,45	10,53	8,16	65,0	
9	70-80	11,4	75,0	13,72	75,55	78,15	10,69	8,28	75,0	
10	80-90	6,01	85,0	7,22	82,77	88,99	10,84	8,40	85,0	
11	90-100	14,3	95,0	17,23	100,00	100,00	11,01	8,53	95,0	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	48,8	0,6			0,5	100,00	40,6	
				0,4			0,4			

Ajuste com a curva beta					
a	1,10	a ini	1,48	Dens cpy	4,30
b	1,00	b ini	1,04	Dens amostra	3,5
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	3,53	7,93	19,36	10,26
3	10-20	8,84	16,99	66,53	6,76
4	20-30	16,63	26,55	98,23	0,82
5	30-40	26,25	36,43	103,58	0,12
6	40-50	38,03	46,57	72,95	3,81
7	50-60	49,93	56,92	48,85	3,58
8	60-70	61,83	67,45	31,62	3,06
9	70-80	75,55	78,15	6,76	9,85
10	80-90	82,77	88,99	38,69	5,69
11	90-100	100,00	100,00	0,00	33,85
Objetivo		95,27	S2 S1 =	48,66	7,78
$\zeta =$		20	ζ S3 =		5,10
$\eta =$		1	η S4 =	33,73	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m mista,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	16,7	0,0	0,0	3,0	22,56	0,0
2	5,0	3,1	2,9	6,9	5,2	3,1	6,14	7,2
3	15,0	3,2	4,4	20,0	15,1	3,2	7,02	20,0
4	25,0	3,4	6,5	32,0	25,0	3,4	7,40	32,1
5	35,0	3,5	8,0	43,2	35,0	3,5	7,65	43,2
6	45,0	3,6	9,8	53,6	45,0	3,6	7,85	53,6
7	55,0	3,7	9,9	63,3	55,0	3,7	8,02	63,3
8	65,0	3,9	9,9	72,4	65,0	3,9	8,16	72,4
9	75,0	4,0	11,4	80,9	75,0	4,0	8,28	80,9
10	85,0	4,1	6,0	88,9	85,0	4,1	8,40	88,9
11	95,0	4,2	14,3	96,4	95,0	4,2	8,53	96,4
	100,0	4,3			100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 18,6	teor metálico (%) = 15,4	teor metálico (%) = 15,6
densidade outros minerais = 3,0	val. metal / val. mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 48,8	teor vol. Balanço fração = 36,3	teor volumétrico beta = 40,6
teor mineral % = 53,7	teor cpy balanço fração % = 44,6	teor mineral (%) = 45,1

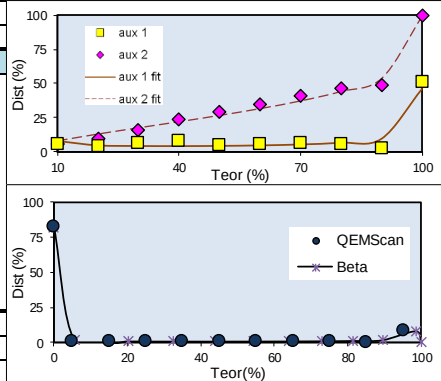
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.30 - Cal 01 - Rejeito Cleaner - Fração -20 μ m

Ensaio	Cal 01	Rej Cleaner	Fração -20 μm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	82,5	0,0	-	-	-	-	82,4	0,00			
2	0-10	0,9	5,0	5,29	5,29	8,18	8,18	1,4	4,0			
3	10-20	0,8	15,0	4,46	9,74	13,19	5,01	0,9	14,9			
4	20-30	1,1	25,0	6,11	15,85	17,74	4,55	0,8	25,0			
5	30-40	1,4	35,0	7,99	23,84	22,22	4,48	0,8	35,0			
6	40-50	0,9	45,0	5,25	29,10	26,84	4,62	0,8	45,0			
7	50-60	1,0	55,0	5,50	34,59	31,83	4,99	0,9	55,1			
8	60-70	1,1	65,0	6,16	40,75	37,49	5,66	1,0	65,1			
9	70-80	1,0	75,0	5,50	46,25	44,40	6,91	1,2	75,2			
10	80-90	0,4	85,0	2,25	48,50	54,16	9,76	1,7	85,4			
11	90-100	9,0	95,0	51,50	100,00	100,00	45,84	8,1	97,9			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	12,2	0,7			0,7	100,00	12,4			
				0,6		0,6						
							Gama	-0,17				

Ajuste com a curva beta						
a	0,64	a ini	0,85	Dens cpy	4,3	
b	0,27	b ini	0,37	Dens amostra	3,1	
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	5,29	8,18	8,37	0,27	
3	10-20	9,74	13,19	11,89	0,01	
4	20-30	15,85	17,74	3,57	0,07	
5	30-40	23,84	22,22	2,63	0,37	
6	40-50	29,10	26,84	5,08	0,01	
7	50-60	34,59	31,83	7,62	0,01	
8	60-70	40,75	37,49	10,64	0,01	
9	70-80	46,25	44,40	3,44	0,07	
10	80-90	48,50	54,16	32,02	1,76	
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,85	
Objetivo		8,89	S2 S1 =	8,53	0,34	
$\zeta =$		20	ζ S3 =		0,00	
$\eta =$		1	η S4 =	0,02		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	82,5	0,0	0,0	3,0	82,39	0,0
2	5,0	3,0	0,9	7,1	4,0	3,0	1,44	5,7
3	15,0	3,2	0,8	20,4	14,9	3,2	0,88	20,2
4	25,0	3,3	1,1	32,6	25,0	3,3	0,80	32,5
5	35,0	3,4	1,4	43,9	35,0	3,4	0,79	43,9
6	45,0	3,6	0,9	54,3	45,0	3,6	0,81	54,3
7	55,0	3,7	1,0	63,9	55,1	3,7	0,88	64,0
8	65,0	3,8	1,1	72,9	65,1	3,8	1,00	73,0
9	75,0	4,0	1,0	81,3	75,2	4,0	1,22	81,5
10	85,0	4,1	0,4	89,2	85,4	4,1	1,72	89,4
11	95,0	4,2	9,0	96,5	97,9	4,3	8,07	98,5
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0					

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	4,5	teor metálico (%) =	4,53	teor metálico (%) =	4,5
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	12,2	teor vol. Balanço fração =	9,4	teor volumétrico beta =	12,4
teor mineral % =	12,9	teor cpy balanço fração % =	13,1	teor mineral (%) =	13,1

Nilce Alves dos Santos

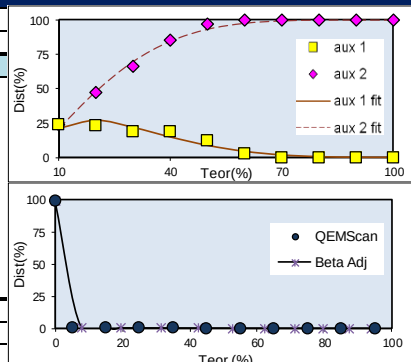
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.31 - Cal 01 - Rejeito Rougher 1 - Fração +212 μm

Dados de entrada estimados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 01	Rej Rg 1 calc	Fração +212 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%	aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _{m mista,j}	Dist auxiliar sem ganga	Dist auxiliar acumulada calculada	Dist auxiliar simples calculada	Dist simples calculada	Teor
					a - F _m	beta- F _m	beta- f _{m mista}	beta- f _{m beta,j}	volumétrico médio beta inicial cpy (%)
					mista,j	mista beta,j	beta,j		
1	0	98,8	0,0	-	-	-	-	98,8	0,00
2	0-10	0,3	5,0	23,76	23,76	21,14	21,14	0,3	5,8
3	10-20	0,3	15,0	23,38	47,15	48,06	26,93	0,3	14,9
4	20-30	0,2	25,0	19,10	66,24	69,81	21,74	0,3	24,7
5	30-40	0,2	35,0	18,99	85,23	84,58	14,78	0,2	34,6
6	40-50	0,1	45,0	12,03	97,27	93,28	8,70	0,1	44,5
7	50-60	0,0	55,0	2,73	100,00	97,65	4,36	0,1	54,3
8	60-70	0,0	65,0	0,00	100,00	99,41	1,76	0,0	64,1
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,00	99,92	0,51	0,0	73,8
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,08	0,0	83,1
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	91,7
			100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	0,3	0,2			0,2	100,00	0,3
				0,1			0,1		
							Gama	-0.02	

Ajuste com a curva beta					
a	1,55	aini	1,75	Dens cpy	4,30
b	5,03	bini	5,84	Dens amostra	3,1
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	23,76	21,14	6,90	0,00
3	10-20	47,15	48,06	0,84	0,00
4	20-30	66,24	69,81	12,72	0,00
5	30-40	85,23	84,58	0,42	0,00
6	40-50	97,27	93,28	15,85	0,00
7	50-60	100,00	97,65	5,54	0,00
8	60-70	100,00	99,41	0,35	0,00
9	70-80	100,00	99,92	0,01	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		4,27	S2 S1 =	4,26	0,00
$\zeta =$		1	ζ S3 =		0,01
$\eta =$		1	η S4 =	0,00	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,1	98,8	0,0	0,0	3,1	98,8	0,0
2	5,0	3,2	0,3	6,8	5,8	3,2	0,26	7,9
3	15,0	3,3	0,3	19,7	14,9	3,3	0,33	19,6
4	25,0	3,4	0,2	31,6	24,7	3,4	0,27	31,3
5	35,0	3,5	0,2	42,8	34,6	3,5	0,18	42,4
6	45,0	3,6	0,1	53,2	44,5	3,6	0,11	52,7
7	55,0	3,8	0,0	62,9	54,3	3,8	0,05	62,3
8	65,0	3,9	0,0	72,1	64,1	3,9	0,02	71,3
9	75,0	4,0	0,0	80,6	73,8	4,0	0,01	79,6
10	85,0	4,1	0,0	88,7	83,1	4,1	0,00	87,2
11	95,0	4,2	0,0	96,3	91,7	4,2	0,00	93,9
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,1	teor metálico (%) =	0,15	teor metálico (%) =	0,1
densidade outros minerais =	3,1	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,1
teor volumétrico =	0,3	teor vol. Balanço fração =	0,31	teor volumétrico beta =	0,29
teor mineral % =	0,3	teor cpy balanço fração % =	0,43	teor mineral (%) =	0,36

Nilce Alves dos Santos

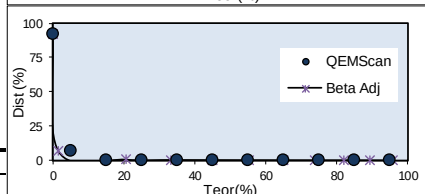
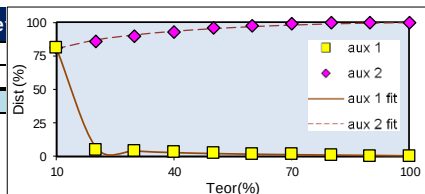
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)- Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.32 - Cal 01 - Rejeito Rougher 1 - Fração -212 +150 μ m

Dados de entrada estimados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 01	Rej Rg 1 Calc	Fração -212 +150 μm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,beta,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	91,7	0,0	-	-	-	-	91,8	0,00			
2	0-10	6,69	5,0	80,83	80,83	80,03	80,03	6,6	1,1			
3	10-20	0,4	15,0	4,83	85,66	86,71	6,68	0,5	14,5			
4	20-30	0,3	25,0	3,97	89,63	90,65	3,94	0,3	24,7			
5	30-40	0,3	35,0	3,35	92,98	93,38	2,73	0,2	34,7			
6	40-50	0,2	45,0	2,68	95,67	95,41	2,02	0,2	44,8			
7	50-60	0,2	55,0	1,98	97,65	96,95	1,55	0,1	54,8			
8	60-70	0,1	65,0	1,30	98,96	98,14	1,19	0,1	64,8			
9	70-80	0,1	75,0	0,71	99,67	99,04	0,90	0,1	74,7			
10	80-90	0,0	85,0	0,27	99,94	99,67	0,63	0,1	84,7			
11	90-100	0,0	95,0	0,06	100,00	100,00	0,33	0,0	94,0			
			100,0	-	-	-	-		100,00			
TOTAL		100,0	0,9	0,1			0,1	100,00	0,6			
				0,0			0,0					
							Gamma	0,06				

Ajuste com a curva beta					
a	0,12	a ini	0,39	Dens cpy	4,30
b	1,46	b ini	3,18	Dens amostra	2,8
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	80,83	80,03	0,64	0,01
3	10-20	85,66	86,71	1,11	0,02
4	20-30	89,63	90,65	1,04	0,00
5	30-40	92,98	93,38	0,16	0,00
6	40-50	95,67	95,41	0,07	0,00
7	50-60	97,65	96,95	0,49	0,00
8	60-70	98,96	98,14	0,66	0,00
9	70-80	99,67	99,04	0,39	0,00
10	80-90	99,94	99,67	0,07	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		0,56	S2 S1 =	0,46	0,00
$\zeta =$		5	ζ S3 =		0,09
$\eta =$		1	η S4 =	0,00	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,8	91,7	0,0	0,0	2,8	91,8	0,0
2	5,0	2,9	6,7	7,5	1,1	2,8	6,58	1,6
3	15,0	3,0	0,4	21,3	14,5	3,0	0,55	20,6
4	25,0	3,2	0,3	33,8	24,7	3,2	0,32	33,4
5	35,0	3,3	0,3	45,2	34,7	3,3	0,22	44,9
6	45,0	3,5	0,2	55,7	44,8	3,5	0,17	55,4
7	55,0	3,6	0,2	65,2	54,8	3,6	0,13	65,0
8	65,0	3,8	0,1	74,0	64,8	3,8	0,10	73,8
9	75,0	3,9	0,1	82,1	74,7	3,9	0,07	82,0
10	85,0	4,1	0,0	89,7	84,7	4,1	0,05	89,4
11	95,0	4,2	0,0	96,7	94,0	4,2	0,03	96,0
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta		
teor metálico (%) =	0,4	teor metálico (%) =	0,23	teor metálico (%) =	0,3
densidade outros minerais =	2,8	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,8
teor volumétrico =	0,9	teor vol. Balanço fração =	0,4	teor volumétrico beta =	0,6
teor mineral % =	1,2	teor cpy balanço fração % =	0,7	teor mineral (%) =	0,8

Nilce Alves dos Santos

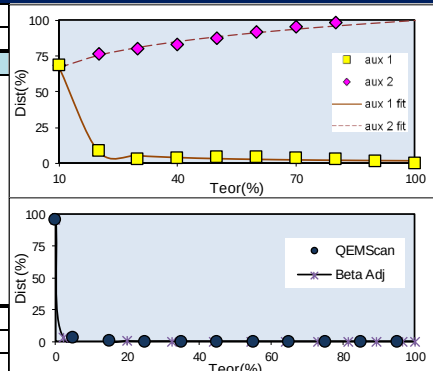
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.33 - Cal 01 - Rejeito Rougher 1 - Fração -150 +74 μ m

Dados de entrada estimados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 01	Rej Rougher 1	Fração -150 +74 μm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,beta,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	95,71	0,0	-	-	-	-	95,7	0,00			
2	0-10	2,93	5,0	68,32	68,32	67,30	67,30	2,9	1,5			
3	10-20	0,36	15,0	8,37	76,69	75,77	8,48	0,4	14,5			
4	20-30	0,14	25,0	3,19	79,88	81,23	5,45	0,2	24,7			
5	30-40	0,15	35,0	3,43	83,31	85,34	4,11	0,2	34,8			
6	40-50	0,17	45,0	3,99	87,30	88,67	3,34	0,1	44,8			
7	50-60	0,18	55,0	4,15	91,45	91,50	2,83	0,1	54,9			
8	60-70	0,16	65,0	3,84	95,29	93,97	2,47	0,1	64,9			
9	70-80	0,13	75,0	3,05	98,34	96,16	2,20	0,1	74,9			
10	80-90	0,07	85,0	1,66	100,00	98,16	1,99	0,1	84,9			
11	90-100	0,00	95,0	0,00	100,00	100,00	1,84	0,1	95,0			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,000	0,7	0,2			0,1	100,00	0,6			
							0,1					
							Gamma	-0,02				

Ajuste com a curva beta					
a	0,17	a ini	0,34	Dens cpy	4,30
b	0,99	b ini	1,65	Dens amostra	2,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	68,32	67,30	1,04	0,00
3	10-20	76,69	75,77	0,84	0,00
4	20-30	79,88	81,23	1,81	0,01
5	30-40	83,31	85,34	4,11	0,00
6	40-50	87,30	88,67	1,88	0,00
7	50-60	91,45	91,50	0,00	0,00
8	60-70	95,29	93,97	1,75	0,00
9	70-80	98,34	96,16	4,73	0,00
10	80-90	100,00	98,16	3,40	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,01
	Objetivo	1,97	S2 S1 =	1,96	0,00
	$\zeta =$	1	ζ S3 =		0,01
	$\eta =$	1	η S4 =		0,00



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe									
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)	
1	0,0	2,9	95,7	0,0	0,0	2,9	95,7	0,0	
2	5,0	3,0	2,9	7,2	1,5	3,0	2,90	2,1	
3	15,0	3,1	0,4	20,6	14,5	3,1	0,37	20,0	
4	25,0	3,3	0,1	32,8	24,7	3,3	0,23	32,5	
5	35,0	3,4	0,1	44,1	34,8	3,4	0,18	43,9	
6	45,0	3,5	0,2	54,5	44,8	3,5	0,14	54,4	
7	55,0	3,7	0,2	64,2	54,9	3,7	0,12	64,1	
8	65,0	3,8	0,2	73,1	64,9	3,8	0,11	73,1	
9	75,0	4,0	0,1	81,5	74,9	4,0	0,09	81,4	
10	85,0	4,1	0,1	89,3	84,9	4,1	0,09	89,2	
11	95,0	4,2	0,0	96,5	95,0	4,2	0,08	96,5	
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,00	100,0	
			100,0				100,0		

Antes do ajuste beta, dados de liberação			relações entre dados volume/massa			Depois do ajuste beta		
teor metálico (%) =	0,3		teor metálico (%) =	0,29		teor metálico (%) =	0,3	
densidade outros minerais =	2,9		val.metal / val.mineral =	0,35		densidade outros minerais =	2,9	
teor volumétrico =	0,7		teor vol. Balanço fração	0,6		teor volumétrico beta =	0,6	
teor mineral % =	0,9		teor cpy balanço fração % =	0,8		teor mineral (%) =	0,8	

Nilce Alves dos Santos

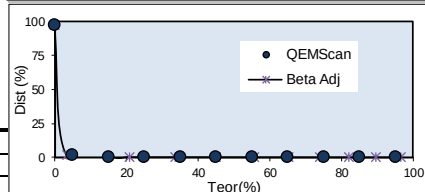
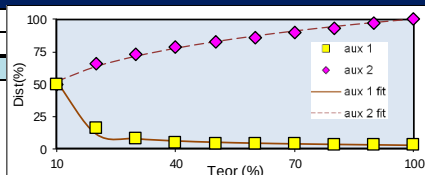
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.34 - Cal 01 - Rejeito Rougher 1 - Fração -74 +44 μ m

Dados de entrada estimados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 01	Rej Rg 1	Fração -74 +44 μm													
Dados de entrada e funções auxiliares																
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada					
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)							
1	0	97,1	0,0	-	-	-	-	97,1	0,00							
2	0-10	1,47	5,0	49,77	49,77	52,18	52,18	1,5	2,2							
3	10-20	0,46	15,0	15,68	65,45	63,65	11,46	0,3	14,6							
4	20-30	0,23	25,0	7,76	73,22	71,46	7,81	0,2	24,8							
5	30-40	0,15	35,0	5,05	78,26	77,55	6,09	0,2	34,8							
6	40-50	0,12	45,0	4,14	82,41	82,61	5,06	0,1	44,9							
7	50-60	0,11	55,0	3,83	86,24	86,96	4,35	0,1	54,9							
8	60-70	0,11	65,0	3,66	89,90	90,79	3,83	0,1	64,9							
9	70-80	0,10	75,0	3,49	93,40	94,21	3,42	0,1	74,9							
10	80-90	0,10	85,0	3,29	96,69	97,28	3,07	0,1	84,9							
11	90-100	0,10	95,0	3,31	100,00	100,00	2,72	0,1	94,9							
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00							
TOTAL		100,0	0,7	0,2			0,2	100,00	0,6							
				0,1			0,1									
				Gama												
				0,00												

Ajuste com a curva beta					
a	0,29	a ini	0,37	Dens cpy	4,3
b	1,03	b ini	1,21	Dens amostra	2,8
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	49,77	52,18	5,83	0,01
3	10-20	65,45	63,65	3,26	0,02
4	20-30	73,22	71,46	3,09	0,00
5	30-40	78,26	77,55	0,51	0,00
6	40-50	82,41	82,61	0,04	0,00
7	50-60	86,24	86,96	0,53	0,00
8	60-70	89,90	90,79	0,79	0,00
9	70-80	93,40	94,21	0,67	0,00
10	80-90	96,69	97,28	0,35	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		1,51	S2 S1 =	1,51	0,00
$\zeta =$		5	ζ S3 =		0,00
$\eta =$		1	η S4 =	0,00	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada - $\beta_{m \text{ mista},j}$	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,8	97,1	0,0	0,0	2,8	97,05	0,0
2	5,0	2,9	1,5	7,5	2,2	2,8	1,54	3,4
3	15,0	3,0	0,5	21,3	14,6	3,0	0,34	20,8
4	25,0	3,2	0,2	33,8	24,8	3,2	0,23	33,5
5	35,0	3,3	0,1	45,2	34,8	3,3	0,18	45,1
6	45,0	3,5	0,1	55,7	44,9	3,5	0,15	55,5
7	55,0	3,6	0,1	65,2	54,9	3,6	0,13	65,1
8	65,0	3,8	0,1	74,0	64,9	3,8	0,11	73,9
9	75,0	3,9	0,1	82,2	74,9	3,9	0,10	82,1
10	85,0	4,1	0,1	89,7	84,9	4,1	0,09	89,6
11	95,0	4,2	0,1	96,7	94,9	4,2	0,08	96,6
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,3	teor metálico (%) =	0,27	teor metálico (%) =	0,3
densidade outros minerais =	2,8	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,8
teor volumétrico =	0,7	teor vol. Balanço fração =	0,51	teor volumétrico beta =	0,6
teor mineral % =	0,8	teor cpy balanço fração % =	0,77	teor mineral (%) =	0,77

Nilce Alves dos Santos

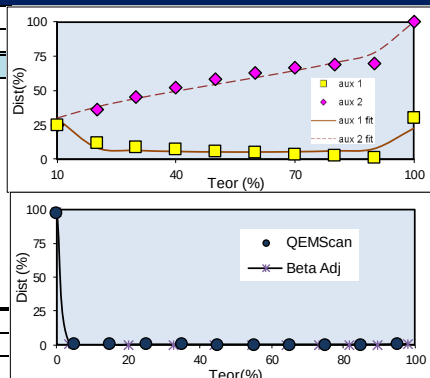
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.35 - Cal 01 - Rejeito Rougher 1 - Fração -44 +20 μ m

Dados de entrada estimados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 01	Rej Rg1	Fração -44 +20 μm										
Dados de entrada e funções auxiliares													
bin		mass%		aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)				
1	0	96,9	0,0	-	-	-	-	97,7	0,00				
2	0-10	0,8	5,0	24,37	24,37	29,89	29,89	0,7	2,5				
3	10-20	0,4	15,0	11,68	36,05	38,00	8,11	0,2	14,7				
4	20-30	0,3	25,0	9,00	45,06	44,12	6,12	0,1	24,8				
5	30-40	0,2	35,0	7,30	52,36	49,42	5,31	0,1	34,9				
6	40-50	0,2	45,0	5,96	58,32	54,38	4,96	0,1	45,0				
7	50-60	0,1	55,0	4,76	63,08	59,29	4,90	0,1	55,0				
8	60-70	0,1	65,0	3,58	66,66	64,41	5,12	0,1	65,1				
9	70-80	0,1	75,0	2,30	68,96	70,16	5,75	0,1	75,1				
10	80-90	0,0	85,0	0,79	69,76	77,51	7,35	0,2	85,3				
11	90-100	0,9	95,0	30,24	100,00	100,00	22,49	0,5	97,2				
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00				
TOTAL		100,0	1,4	0,5			0,5	100,00	1,0				
							0,4						
							Gama	0,89					

Ajuste com a curva beta					
a	0,32	a ini	0,40	Dens cpy	4,30
b	0,38	b ini	0,45	Dens amostra	3,0
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	24,37	29,89	30,46	0,01
3	10-20	36,05	38,00	3,79	0,03
4	20-30	45,06	44,12	0,89	0,02
5	30-40	52,36	49,42	8,62	0,01
6	40-50	58,32	54,38	15,49	0,01
7	50-60	63,08	59,29	14,40	0,00
8	60-70	66,66	64,41	5,07	0,00
9	70-80	68,96	70,16	1,44	0,00
10	80-90	69,76	77,51	60,06	0,02
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,19
	Objetivo	15,40	S2 S1 =	14,02	0,03
	$\zeta =$	5	ζ S3 =		0,61
	$\eta =$	1	η S4 =	0,74	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	96,9	0,0	0,0	2,9	97,75	0,0
2	5,0	3,0	0,8	7,1	2,5	3,0	0,67	3,6
3	15,0	3,1	0,4	20,5	14,7	3,1	0,18	20,1
4	25,0	3,3	0,3	32,8	24,8	3,3	0,14	32,6
5	35,0	3,4	0,2	44,0	34,9	3,4	0,12	43,9
6	45,0	3,6	0,2	54,5	45,0	3,6	0,11	54,4
7	55,0	3,7	0,1	64,1	55,0	3,7	0,11	64,1
8	65,0	3,8	0,1	73,1	65,1	3,8	0,12	73,1
9	75,0	4,0	0,1	81,4	75,1	4,0	0,13	81,5
10	85,0	4,1	0,0	89,2	85,3	4,1	0,17	89,4
11	95,0	4,2	0,9	96,5	97,2	4,3	0,51	98,1
	100,0	4,3			100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,5	teor metálico (%) =	0,27	teor metálico (%) =	0,4
densidade outros minerais =	2,9	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,9
teor volumétrico =	1,4	teor vol. Balanço fração =	0,5	teor volumétrico beta =	1,0
teor mineral % =	1,6	teor cpy balanço fração % =	0,8	teor mineral (%) =	1,1

Nilce Alves dos Santos

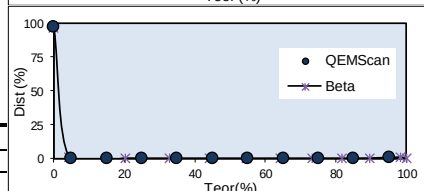
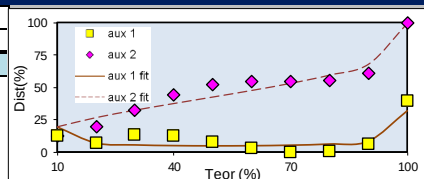
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.36 - Cal 01 - Rejeito Rougher 1 - Fração -20 μ m

Dados de entrada estimados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 01	Rej Rg1	Fração -20 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	97,0	0,0	-	-	-	-	96,8	0,00	
2	0-10	0,4	5,0	12,38	12,38	19,51	19,51	0,6	3,0	
3	10-20	0,2	15,0	6,98	19,36	26,68	7,16	0,2	14,7	
4	20-30	0,4	25,0	12,96	32,32	32,41	5,73	0,2	24,9	
5	30-40	0,4	35,0	11,99	44,31	37,59	5,18	0,2	34,9	
6	40-50	0,2	45,0	7,33	51,64	42,60	5,01	0,2	45,0	
7	50-60	0,1	55,0	2,59	54,23	47,71	5,11	0,2	55,0	
8	60-70	0,0	65,0	0,06	54,28	53,22	5,51	0,2	65,1	
9	70-80	0,0	75,0	0,68	54,97	59,62	6,40	0,2	75,2	
10	80-90	0,2	85,0	5,79	60,76	68,15	8,53	0,3	85,3	
11	90-100	1,2	95,0	39,24	100,00	100,00	31,85	1,0	97,5	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	1,7	0,6			0,6	100,00	1,8	
				0,4			0,5			
							Gama	-0.18		

Ajuste com a curva beta					
a	0,42	a ini	0,53	Dens cpy	4,3
b	0,32	b ini	0,40	Dens amostra	3,0
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	12,38	19,51	50,88	0,06
3	10-20	19,36	26,68	53,47	0,00
4	20-30	32,32	32,41	0,01	0,04
5	30-40	44,31	37,59	45,21	0,04
6	40-50	51,64	42,60	81,69	0,00
7	50-60	54,23	47,71	42,43	0,01
8	60-70	54,28	53,22	1,12	0,03
9	70-80	54,97	59,62	21,66	0,03
10	80-90	60,76	68,15	54,69	0,01
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,03
	Objetivo	35,19	S2 S1 =	35,12	0,03
	ζ =	5	ζ S3 =		0,02
	η =	1	η S4 =	0,03	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	97,0	0,0	0,0	2,9	96,84	0,0
2	5,0	3,0	0,4	7,2	3,0	3,0	0,6	4,4
3	15,0	3,1	0,2	20,6	14,7	3,1	0,2	20,2
4	25,0	3,3	0,4	32,8	24,9	3,3	0,2	32,7
5	35,0	3,4	0,4	44,1	34,9	3,4	0,2	44,1
6	45,0	3,5	0,2	54,5	45,0	3,5	0,2	54,5
7	55,0	3,7	0,1	64,2	55,0	3,7	0,16	64,2
8	65,0	3,8	0,0	73,1	65,1	3,8	0,17	73,2
9	75,0	4,0	0,0	81,5	75,2	4,0	0,20	81,6
10	85,0	4,1	0,2	89,3	85,3	4,1	0,27	89,5
11	95,0	4,2	1,2	96,5	97,5	4,3	1,01	98,3
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 0,6	teor metálico (%) = 0,68	teor metálico (%) = 0,7
densidade outros minerais = 2,9	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 2,9
teor volumétrico = 1,7	teor vol. Balanço fração = 1,4	teor volumétrico beta = 1,8
teor mineral % = 1,8	teor cpy balanço fração % = 2,0	teor mineral (%) = 1,9

Nilce Alves dos Santos

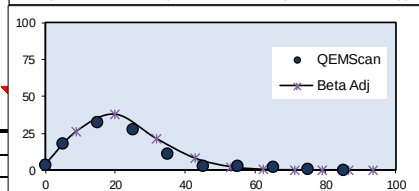
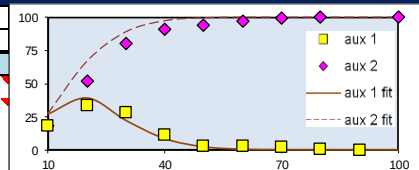
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.37 - Cal 01- Conc Rougher 2 - Fração +212 μm

Dados de entrada estimados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio		Cal 01	Conc Rg 2 calc		Fração +212 µm					
Dados de entrada e funções auxiliares										
		bin	mass%		aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - $f_{m \text{ mista},j}$	Dist auxiliar sem ganga acumulad a - F_m		Dist auxiliar acumulada calculada beta- F_m	Dist auxiliar simples calculada beta- $f_{m \text{ mista},j}$	Dist simples calculada beta- $f_{m \text{ beta},j}$	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
					mista,j		mista beta,j	beta,j		
1	0	3,5	0,0	-	-		-	-	3,8	0,00
2	0-10	17,6	5,0	18,24	18,24	27,29	27,29	26,2	6,4	
3	10-20	32,2	15,0	33,37	51,60	66,64	39,35	37,8	14,7	
4	20-30	27,5	25,0	28,50	80,11	88,90	22,25	21,4	24,3	
5	30-40	10,9	35,0	11,30	91,40	97,29	8,39	8,1	34,1	
6	40-50	2,8	45,0	2,89	94,29	99,54	2,25	2,2	43,8	
7	50-60	2,9	55,0	2,99	97,28	99,95	0,41	0,4	53,5	
8	60-70	2,0	65,0	2,10	99,38	100,00	0,05	0,0	63,0	
9	70-80	0,6	75,0	0,57	99,95	100,00	0,00	0,0	72,5	
10	80-90	0,0	85,0	0,05	100,00	100,00	0,00	0,0	81,7	
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	90,8	
			100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	21,0	0,2				0,2	100,00	16,4
				0,1				0,0		
								Gama	9,18	

Ajuste com a curva beta					
a	2,26	aini	1,68	Dens cpy	4,30
b	10,98	bini	6,04	Dens amostra	3,2
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	18,24	27,29	81,98	74,82
3	10-20	51,60	66,64	226,23	31,93
4	20-30	80,11	88,90	77,29	37,24
5	30-40	91,40	97,29	34,63	8,02
6	40-50	94,29	99,54	27,54	0,39
7	50-60	97,28	99,95	7,12	6,20
8	60-70	99,38	100,00	0,38	3,91
9	70-80	99,95	100,00	0,00	0,30
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		71,31	S2 S1 =	45,52	16,28
$\zeta =$		20	ζ S3 =		8,48
$\eta =$		10	η S4 =	1,03	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe									
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)	
1	0,0	3,0	3,5	0,0	0,0	3,0	3,8	0,0	
2	5,0	3,1	17,6	7,0	6,4	3,1	26,2	8,9	
3	15,0	3,2	32,2	20,3	14,7	3,2	37,8	19,9	
4	25,0	3,3	27,5	32,4	24,3	3,3	21,4	31,6	
5	35,0	3,4	10,9	43,7	34,1	3,4	8,1	42,6	
6	45,0	3,6	2,8	54,1	43,8	3,6	2,2	52,9	
7	55,0	3,7	2,9	63,8	53,5	3,7	0,4	62,3	
8	65,0	3,8	2,0	72,8	63,0	3,8	0,0	71,1	
9	75,0	4,0	0,6	81,2	72,5	3,9	0,0	79,1	
10	85,0	4,1	0,0	89,1	81,7	4,1	0,0	86,5	
11	95,0	4,2	0,0	96,5	90,8	4,2	0,0	93,5	
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0	
			100,0				100,0		

Antes do ajuste beta, dados de liberação			relações entre dados volume/massa			Depois do ajuste beta		
teor metálico (%) =	9,3		teor metálico (%) =	7,22		teor metálico (%) =	7,4	
densidade outros minerais =	3,0		val.metal / val.mineral =	0,35		densidade outros minerais =	3,0	
teor volumétrico =	21,0		teor vol. Balanço fração =	15,5		teor volumétrico beta =	16,4	
teor mineral % =	26,8		teor cpy balanço fração % =	20,9		teor mineral (%) =	21,5	

Nilce Alves dos Santos

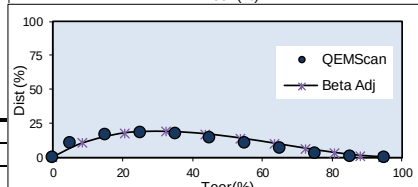
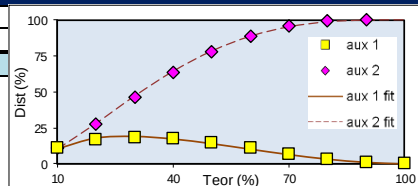
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.38 - Cal 01- Conc Rougher 2 - Fração -212 +150 μ m

Dados de entrada estimados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 01	Conc Rg 2 Calc	Fração -212 +150 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	0,1	0,0	-	-	-	-	0,1	0,00	
2	0-10	11,0	5,0	10,97	10,97	10,41	10,41	10,4	6,1	
3	10-20	16,6	15,0	16,59	27,56	28,22	17,81	17,8	15,2	
4	20-30	18,5	25,0	18,50	46,06	47,16	18,95	18,9	25,0	
5	30-40	17,4	35,0	17,43	63,48	64,38	17,22	17,2	34,9	
6	40-50	14,6	45,0	14,58	78,06	78,39	14,02	14,0	44,8	
7	50-60	10,8	55,0	10,83	88,90	88,64	10,24	10,2	54,7	
8	60-70	6,9	65,0	6,88	95,78	95,19	6,55	6,5	64,6	
9	70-80	3,3	75,0	3,35	99,12	98,62	3,43	3,4	74,3	
10	80-90	0,9	85,0	0,86	99,98	99,84	1,23	1,2	83,9	
11	90-100	0,1	95,0	0,10	100,08	100,00	0,16	0,2	92,4	
			100,0	-	-	-	-	-	100,00	
TOTAL			100,1	34,1	0,3		0,3	100,00	33,9	
				0,2			0,2			
							Gamma	61,11		

Ajuste com a curva beta					
a	1,65	a ini	1,67	Dens cpy	4,30
b	3,23	b ini	3,24	Dens amostra	3,4
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	10,97	10,41	0,31	0,32
3	10-20	27,56	28,22	0,43	1,46
4	20-30	46,06	47,16	1,22	0,19
5	30-40	63,48	64,38	0,80	0,05
6	40-50	78,06	78,39	0,11	0,33
7	50-60	88,90	88,64	0,07	0,35
8	60-70	95,78	95,19	0,35	0,11
9	70-80	99,12	98,62	0,26	0,01
10	80-90	99,98	99,84	0,02	0,14
11	90-100	100,08	100,00	0,01	0,00
Objetivo		0,71	S2 S1 =	0,36	0,30
$\zeta =$		5	ζ S3 =		0,05
$\eta =$		1	η S4 =	0,00	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	0,1	0,0	0,0	3,0	0,13	0,0
2	5,0	3,0	11,0	7,0	6,1	3,1	10,4	8,5
3	15,0	3,2	16,6	20,3	15,2	3,2	17,8	20,5
4	25,0	3,3	18,5	32,4	25,0	3,3	18,9	32,4
5	35,0	3,4	17,4	43,7	34,9	3,4	17,2	43,6
6	45,0	3,6	14,6	54,1	44,8	3,6	14,0	53,9
7	55,0	3,7	10,8	63,8	54,7	3,7	10,23	63,5
8	65,0	3,8	6,9	72,8	64,6	3,8	6,54	72,4
9	75,0	4,0	3,3	81,2	74,3	4,0	3,42	80,7
10	85,0	4,1	0,9	89,1	83,9	4,1	1,23	88,2
11	95,0	4,2	0,1	96,5	92,4	4,2	0,16	94,6
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
100,1							100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	14,2	teor metálico (%) =	14,12	teor metálico (%) =	14,2
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	34,1	teor vol. Balanço fração =	32,4	teor volumétrico beta =	33,9
teor mineral % =	41,1	teor cpy balanço fração % =	40,8	teor mineral (%) =	40,9

Nilce Alves dos Santos

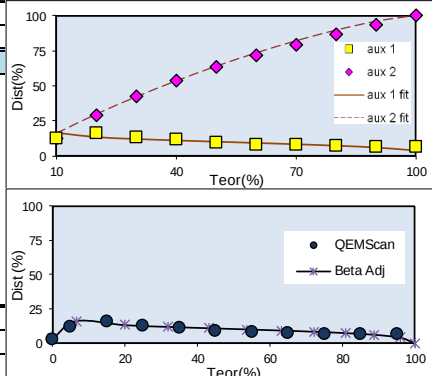
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.39 - Cal 01- Conc Rougher 2 - Fração -150+74 μ m

Dados de entrada estimados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 01	Conc Rg 2	Fração -150 +74 μm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	2,9	0,0	-	-	-	-	3,2	0,00			
2	0-10	12,2	5,0	12,54	12,54	16,69	16,69	16,2	4,7			
3	10-20	16,0	15,0	16,48	29,02	30,25	13,57	13,1	14,9			
4	20-30	12,9	25,0	13,24	42,26	42,50	12,25	11,9	24,9			
5	30-40	11,4	35,0	11,79	54,04	53,74	11,24	10,9	34,9			
6	40-50	9,1	45,0	9,34	63,38	64,07	10,33	10,0	44,9			
7	50-60	8,1	55,0	8,29	71,68	73,53	9,46	9,2	54,9			
8	60-70	7,7	65,0	7,88	79,56	82,07	8,54	8,3	64,9			
9	70-80	6,9	75,0	7,10	86,66	89,60	7,53	7,3	74,9			
10	80-90	6,4	85,0	6,62	93,29	95,88	6,27	6,1	84,8			
11	90-100	6,5	95,0	6,71	100,00	100,00	4,12	4,0	94,3			
100			100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	40,5	0,4			0,4	100,00	38,7			
				0,3			0,2					
							Gamma	9,33				

Ajuste com a curva beta					
a	0,88	a ini	0,88	Dens cpy	4,30
b	1,32	b ini	1,23	Dens amostra	3,5
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	12,54	16,69	17,21	15,85
3	10-20	29,02	30,25	1,53	8,20
4	20-30	42,26	42,50	0,06	0,99
5	30-40	54,04	53,74	0,09	0,32
6	40-50	63,38	64,07	0,48	0,88
7	50-60	71,68	73,53	3,43	1,21
8	60-70	79,56	82,07	6,31	0,38
9	70-80	86,66	89,60	8,65	0,16
10	80-90	93,29	95,88	6,71	0,13
11	90-100	100,00	100,00	0,00	6,38
Objetivo		8,72	S2 S1 =	4,45	3,45
$\zeta =$		5	ζ S3 =		0,60
$\eta =$		3	η S4 =	0,22	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	2,9	0,0	0,0	3,0	3,19	0,0
2	5,0	3,1	12,2	6,9	4,7	3,1	16,2	6,5
3	15,0	3,2	16,0	20,0	14,9	3,2	13,1	19,9
4	25,0	3,4	12,9	32,0	24,9	3,4	11,9	32,0
5	35,0	3,5	11,4	43,2	34,9	3,5	10,9	43,2
6	45,0	3,6	9,1	53,7	44,9	3,6	10,0	53,6
7	55,0	3,7	8,1	63,4	54,9	3,7	9,15	63,3
8	65,0	3,9	7,7	72,4	64,9	3,9	8,27	72,4
9	75,0	4,0	6,9	80,9	74,9	4,0	7,29	80,8
10	85,0	4,1	6,4	88,9	84,8	4,1	6,07	88,8
11	95,0	4,2	6,5	96,4	94,3	4,2	3,99	95,9
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,00	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	16,0	teor metálico (%) =	15,24	teor metálico (%) =	15,4
densidade outros minerais =	3,0	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	40,5	teor vol. Balanço fração =	35,7	teor volumétrico beta =	38,7
teor mineral % =	46,2	teor cpy balanço fração % =	44,0	teor mineral (%) =	44,4

Nilce Alves dos Santos

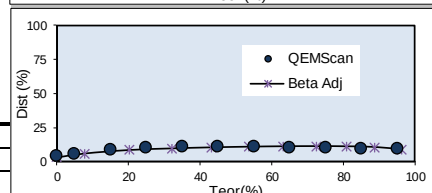
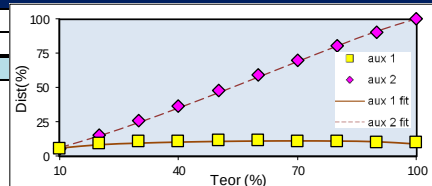
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.40 - Cal 01- Conc Rougher 2 - Fração -74 +44 μ m

Dados de entrada estimados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 01	Conc Rg2		Fração -74 +44 μm						
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%			aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	3,8	0,0	-	-	-	-	3,1	0,00	
2	0-10	5,5	5,0	5,74	5,74	6,07	6,07	5,9	5,6	
3	10-20	9,0	15,0	9,35	15,09	14,66	8,59	8,3	15,1	
4	20-30	10,2	25,0	10,56	25,65	24,44	9,77	9,5	25,1	
5	30-40	10,7	35,0	11,10	36,75	34,97	10,53	10,2	35,0	
6	40-50	10,8	45,0	11,27	48,02	46,00	11,03	10,7	45,0	
7	50-60	10,7	55,0	11,17	59,19	57,33	11,33	11,0	55,0	
8	60-70	10,4	65,0	10,86	70,05	68,77	11,43	11,1	65,0	
9	70-80	10,0	75,0	10,38	80,43	80,07	11,31	11,0	75,0	
10	80-90	9,4	85,0	9,78	90,21	90,89	10,82	10,5	84,9	
11	90-100	9,4	95,0	9,79	100,00	100,00	9,11	8,8	94,7	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	49,9	0,5			0,5	100,00	51,1	
				0,3			0,3			
							Gama	-19,64		

Ajuste com a curva beta						
a	1,29	a ini	1,25	Dens cpy	4,3	
b	1,15	b ini	1,16	Dens amostra	3,7	
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	5,74	6,07	0,11	0,13	
3	10-20	15,09	14,66	0,18	0,45	
4	20-30	25,65	24,44	1,47	0,46	
5	30-40	36,75	34,97	3,17	0,22	
6	40-50	48,02	46,00	4,05	0,02	
7	50-60	59,19	57,33	3,43	0,06	
8	60-70	70,05	68,77	1,64	0,40	
9	70-80	80,43	80,07	0,12	0,95	
10	80-90	90,21	90,89	0,47	1,16	
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,35	
	Objetivo	4,10	S2 S1 =	1,47	0,42	
	$\zeta =$	1	ζ S3 =		1,66	
	$\eta =$	1	η S4 =	0,56		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	3,8	0,0	0,0	3,0	3,06	0,0
2	5,0	3,1	5,5	6,9	5,6	3,1	5,89	7,7
3	15,0	3,2	9,0	19,9	15,1	3,2	8,33	20,1
4	25,0	3,4	10,2	32,0	25,1	3,4	9,48	32,1
5	35,0	3,5	10,7	43,2	35,0	3,5	10,21	43,2
6	45,0	3,6	10,8	53,6	45,0	3,6	10,70	53,6
7	55,0	3,7	10,7	63,3	55,0	3,7	10,98	63,3
8	65,0	3,9	10,4	72,4	65,0	3,9	11,08	72,4
9	75,0	4,0	10,0	80,9	75,0	4,0	11,0	80,9
10	85,0	4,1	9,4	88,9	84,9	4,1	10,5	88,8
11	95,0	4,2	9,4	96,4	94,7	4,2	8,8	96,2
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 19,3	teor metálico (%) = 20,2	teor metálico (%) = 19,7
densidade outros minerais = 3,0	val. metal / val. mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 49,9	teor vol. Balanço fração = 49,7	teor volumétrico beta = 51,1
teor mineral % = 55,7	teor cpy balanço fração % = 58,3	teor mineral (%) = 57,0

Nilce Alves dos Santos

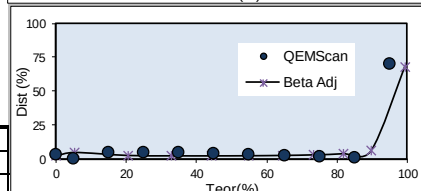
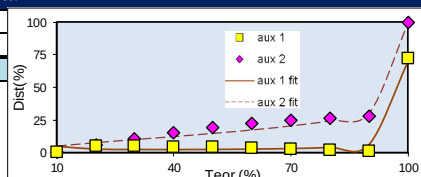
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.41 - Cal 01- Conc Rougher 2 - Fração -44 +20 μ m

Dados de entrada estimados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 01	Conc Rg2		Fração -44 +20 μm						
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%		aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	3,2	0,0	-	-	-	-	2,2	0,00	
2	0-10	0,4	5,0	0,45	0,45	4,89	4,89	4,8	3,7	
3	10-20	4,9	15,0	5,06	5,51	7,55	2,65	2,6	14,8	
4	20-30	4,8	25,0	4,96	10,47	9,92	2,37	2,3	25,0	
5	30-40	4,4	35,0	4,54	15,01	12,24	2,33	2,3	35,0	
6	40-50	3,9	45,0	4,00	19,01	14,66	2,42	2,4	45,1	
7	50-60	3,2	55,0	3,34	22,36	17,32	2,66	2,6	55,1	
8	60-70	2,5	65,0	2,58	24,94	20,42	3,10	3,0	65,2	
9	70-80	1,7	75,0	1,74	26,67	24,37	3,95	3,9	75,3	
10	80-90	1,1	85,0	1,17	27,85	30,38	6,01	5,9	85,5	
11	90-100	69,8	95,0	72,15	100,00	100,00	69,62	68,1	99,0	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
	TOTAL	100,0	77,2	0,8			0,8	100,00	81,7	
							0,8			
							Gama	-31.24		

Ajuste com a curva beta					
a	0,57	a ini	0,99	Dens cpy	4,30
b	0,11	b ini	0,25	Dens amostra	4,0
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	0,45	4,89	19,74	18,91
3	10-20	5,51	7,55	4,14	5,31
4	20-30	10,47	9,92	0,31	6,15
5	30-40	15,01	12,24	7,68	4,51
6	40-50	19,01	14,66	18,90	2,25
7	50-60	22,36	17,32	25,35	0,41
8	60-70	24,94	20,42	20,40	0,28
9	70-80	26,67	24,37	5,30	4,76
10	80-90	27,85	30,38	6,43	22,50
11	90-100	100,00	100,00	0,00	3,07
Objetivo		18,89	S2 S1 =	10,83	6,81
$\zeta =$		5	ζ S3 =		0,23
$\eta =$		1	η S4 =	1,02	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	3,2	0,0	0,0	2,9	2,22	0,0
2	5,0	3,0	0,4	7,2	3,7	3,0	4,78	5,4
3	15,0	3,1	4,9	20,7	14,8	3,1	2,60	20,5
4	25,0	3,3	4,8	33,0	25,0	3,3	2,32	32,9
5	35,0	3,4	4,4	44,3	35,0	3,4	2,27	44,3
6	45,0	3,5	3,9	54,7	45,1	3,5	2,37	54,7
7	55,0	3,7	3,2	64,3	55,1	3,7	2,60	64,4
8	65,0	3,8	2,5	73,3	65,2	3,8	3,03	73,4
9	75,0	4,0	1,7	81,6	75,3	4,0	3,86	81,8
10	85,0	4,1	1,1	89,3	85,5	4,1	5,88	89,7
11	95,0	4,2	69,8	96,6	99,0	4,3	68,07	99,3
	100,0	4,3			100,0	4,3		100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 27,8	teor metálico (%) = 29,1	teor metálico (%) = 29,0
densidade outros minerais = 2,9	val. metal / val. mineral = 0,35	densidade outros minerais = 2,9
teor volumétrico = 77,2	teor vol. Balanço fração = 78,1	teor volumétrico beta = 81,7
teor mineral % = 80,4	teor cpy balanço fração % = 84,0	teor mineral (%) = 83,8

Nilce Alves dos Santos

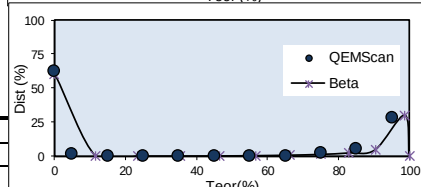
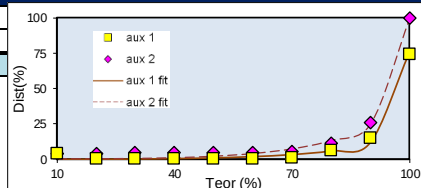
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.1.42 - Cal 01- Conc Rougher 2 - Fração -20 μ m

Dados de entrada (QEMScan) calculados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 01	Conc Rg 2		Fração -20 µm								
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	62,3	0,0	-	-	-	-	60,1	0,00			
2	0-10	1,4	5,0	3,82	3,82	0,01	0,01	0,0	7,7			
3	10-20	0,1	15,0	0,16	3,99	0,07	0,07	0,0	16,3			
4	20-30	0,0	25,0	0,11	4,09	0,30	0,22	0,1	25,8			
5	30-40	0,0	35,0	0,12	4,21	0,82	0,53	0,2	35,6			
6	40-50	0,1	45,0	0,17	4,38	1,87	1,05	0,4	45,5			
7	50-60	0,1	55,0	0,39	4,77	3,78	1,91	0,8	55,5			
8	60-70	0,2	65,0	0,45	5,22	7,14	3,35	1,3	65,5			
9	70-80	2,2	75,0	5,76	10,98	13,09	5,95	2,4	75,5			
10	80-90	5,5	85,0	14,57	25,55	24,75	11,67	4,6	85,6			
11	90-100	28,0	95,0	74,45	100,00	100,00	75,25	30,0	98,0			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
	TOTAL	100,0	33,3	0,9			0,9	100,00	36,7			
				0,8			0,9					
							Gama	-3.49				

Ajuste com a curva beta					
a	3,27	a ini	1,83	Dens cpy	4,3
b	0,28	b ini	0,24	Dens amostra	3,2
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	3,82	0,01	14,57	2,07
3	10-20	3,99	0,07	15,31	0,00
4	20-30	4,09	0,30	14,41	0,00
5	30-40	4,21	0,82	11,46	0,03
6	40-50	4,38	1,87	6,29	0,12
7	50-60	4,77	3,78	0,97	0,38
8	60-70	5,22	7,14	3,69	1,37
9	70-80	10,98	13,09	4,46	0,04
10	80-90	25,55	24,75	0,63	0,71
11	90-100	100,00	100,00	0,00	3,76
	Objetivo	8,65	S2 S1 =	7,18	0,85
	$\zeta =$	1	ζ S3 =		0,15
	$\eta =$	0,1	η S4 =	0,47	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,7	62,3	0,0	0,0	2,7	60,15	0,0
2	5,0	2,8	1,4	7,7	7,7	2,9	0,00	11,6
3	15,0	3,0	0,1	21,8	16,3	3,0	0,03	23,4
4	25,0	3,1	0,0	34,4	25,8	3,1	0,09	35,4
5	35,0	3,3	0,0	45,9	35,6	3,3	0,21	46,6
6	45,0	3,4	0,1	56,3	45,5	3,4	0,42	56,8
7	55,0	3,6	0,1	65,8	55,5	3,6	0,76	66,2
8	65,0	3,8	0,2	74,5	65,5	3,8	1,34	74,9
9	75,0	3,9	2,2	82,5	75,5	3,9	2,37	82,9
10	85,0	4,1	5,5	89,9	85,6	4,1	4,65	90,4
11	95,0	4,2	28,0	96,8	98,0	4,3	29,99	98,7
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 11,9	teor metálico (%) = 13,16	teor metálico (%) = 13,0
densidade outros minerais = 2,7	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 2,7
teor volumétrico = 33,3	teor vol. Balanço fração = 28,0	teor volumétrico beta = 36,7
teor mineral % = 34,3	teor cpy balanço fração % = 38,0	teor mineral (%) = 37,7

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2 - Ensaio Cal 02

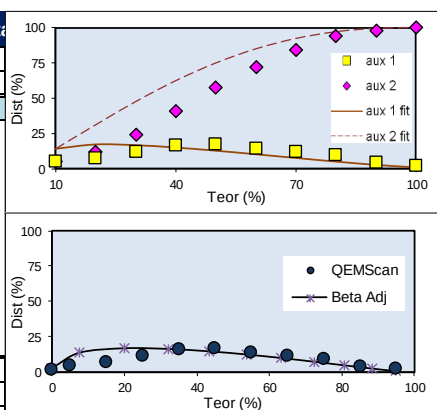
A-V.2.1 - Cal 02- Conc Rougher 1 - Fração +212 μ m

Ensaio	Cal 02	Conc Rg 1		Fração +212 μm					
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	1,9	0,0	-	-	-	-	2,0	0,00
2	0-10	7,32	5,0	7,47	7,47	18,53	18,53	18,2	5,9
3	10-20	16,53	15,0	16,85	24,31	44,51	25,98	25,5	15,0
4	20-30	22,71	25,0	23,15	47,47	66,68	22,18	21,7	24,8
5	30-40	14,79	35,0	15,08	62,55	82,43	15,75	15,4	34,7
6	40-50	26,86	45,0	27,38	89,93	92,08	9,65	9,5	44,5
7	50-60	8,69	55,0	8,86	98,79	97,12	5,04	4,9	54,4
8	60-70	1,19	65,0	1,21	100,00	99,24	2,13	2,1	64,2
9	70-80	0,00	75,0	0,00	100,00	99,89	0,65	0,6	73,8
10	80-90	0,00	85,0	0,00	100,00	100,00	0,11	0,1	83,1
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	91,7
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	31,3	0,3			0,2	100,00	24,4
				0,1					
							Gama	5.12	

A-V.2.2 - Cal 02- Conc Rougher 1 - Fração -212+150 μ m

Ensaio	Cal 01	Conc Rg1	Fração -212 +150 μm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	2,0	0,0	-	-	-	-	-	2,8	0,00		
2	0-10	4,7	5,0	4,77	4,77	13,89	13,89	13,5	5,5			
3	10-20	7,1	15,0	7,21	11,98	30,92	17,03	16,6	15,0			
4	20-30	11,7	25,0	11,94	23,91	47,43	16,50	16,0	24,9			
5	30-40	16,4	35,0	16,69	40,60	62,25	14,83	14,4	34,9			
6	40-50	16,8	45,0	17,18	57,78	74,82	12,57	12,2	44,8			
7	50-60	14,1	55,0	14,44	72,21	84,85	10,02	9,7	54,8			
8	60-70	11,7	65,0	11,95	84,17	92,22	7,37	7,2	64,7			
9	70-80	9,4	75,0	9,58	93,75	97,00	4,78	4,6	74,6			
10	80-90	4,0	85,0	4,05	97,80	99,42	2,42	2,4	84,3			
11	90-100	2,2	95,0	2,20	100,00	100,00	0,58	0,6	92,9			
			100,0	-	-	-	-		100,00			
TOTAL		100,0	45,4	0,5			0,3	100,00	33,7			
				0,3			0,2					
						Gamma		38,10				

Ajuste com a curva beta					
a	1,28	a ini	1,97	Dens cpy	4,30
b	2,41	b ini	2,29	Dens amostra	3,4
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	4,77	13,89	83,27	78,08
3	10-20	11,98	30,92	358,95	90,12
4	20-30	23,91	47,43	552,92	18,93
5	30-40	40,60	62,25	468,78	3,76
6	40-50	57,78	74,82	290,55	21,25
7	50-60	72,21	84,85	159,56	19,38
8	60-70	84,17	92,22	64,83	20,65
9	70-80	93,75	97,00	10,58	22,46
10	80-90	97,80	99,42	2,65	2,60
11	90-100	100,00	100,00	0,00	2,56
Objetivo		249,56	S2 S1 =	199,21	27,98
$\zeta =$		20	ζ S3 =		16,53
$\eta =$		10	η S4 =	5,85	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	2,0	0,0	0,0	3,0	2,77	0,0
2	5,0	3,1	4,7	7,0	5,5	3,1	13,5	7,6
3	15,0	3,2	7,1	20,1	15,0	3,2	16,6	20,1
4	25,0	3,3	11,7	32,2	24,9	3,3	16,0	32,1
5	35,0	3,5	16,4	43,4	34,9	3,5	14,4	43,3
6	45,0	3,6	16,8	53,8	44,8	3,6	12,2	53,6
7	55,0	3,7	14,1	63,5	54,8	3,7	9,74	63,3
8	65,0	3,9	11,7	72,5	64,7	3,8	7,17	72,3
9	75,0	4,0	9,4	81,0	74,6	4,0	4,65	80,7
10	85,0	4,1	4,0	89,0	84,3	4,1	2,36	88,4
11	95,0	4,2	2,2	96,4	92,9	4,2	0,56	94,9
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
				100,0				
Antes do ajuste beta, dados de liberação			relações entre dados volume/massa			Depois do ajuste beta		
teor metálico (%) =			18,1	teor metálico (%) =		13,53	teor metálico (%) =	
densidade outros minerais =			3,0	val.metal / val.mineral =		0,35	densidade outros minerais =	
teor volumétrico =			45,4	teor vol. Balanço fração		31,1	teor volumétrico beta =	
teor mineral % =			52,3	teor cpy balanço fração % =		39,1	teor mineral (%) =	
							40,0	

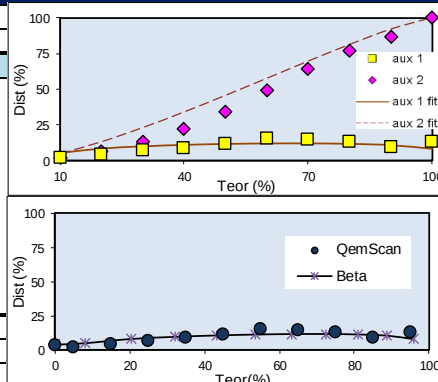
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.3 - Cal 02- Conc Rougher 1 - Fração -150+74 μ m

Ensaio	Cal 02	Conc Rg 1	Fração -150 +74 μm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	3,1	0,0	-	-	-	-	4,0	0,00
2	0-10	1,96	5,0	2,02	2,02	5,21	5,21	5,0	5,8
3	10-20	4,25	15,0	4,39	6,41	13,50	8,29	8,0	15,2
4	20-30	6,78	25,0	7,00	13,40	23,36	9,87	9,5	25,1
5	30-40	8,78	35,0	9,06	22,46	34,25	10,89	10,4	35,1
6	40-50	11,31	45,0	11,67	34,13	45,79	11,54	11,1	45,0
7	50-60	14,86	55,0	15,33	49,47	57,67	11,89	11,4	55,0
8	60-70	14,35	65,0	14,81	64,28	69,60	11,92	11,4	65,0
9	70-80	12,61	75,0	13,02	77,29	81,19	11,60	11,1	75,0
10	80-90	9,17	85,0	9,47	86,76	91,90	10,70	10,3	84,9
11	90-100	12,8	95,0	13,24	100,00	100,00	8,10	7,8	94,5
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	57,5	0,6			0,5	100,00	50,7
				0,4			0,3		
							Gama	29,42	

Ajuste com a curva beta					
a	1,40	a ini	1,89	Dens cpy	4,3
b	1,25	b ini	1,29	Dens amostra	3,6
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	2,02	5,21	10,2	9,27
3	10-20	6,41	13,50	50,3	13,72
4	20-30	13,40	23,36	99,2	7,23
5	30-40	22,46	34,25	138,9	2,79
6	40-50	34,13	45,79	135,82	0,05
7	50-60	49,47	57,67	67,32	11,91
8	60-70	64,28	69,60	28,32	8,43
9	70-80	77,29	81,19	15,22	2,19
10	80-90	86,76	91,90	26,40	1,21
11	90-100	100,00	100,00	0,00	25,52
Objetivo		74,79	S2 S1 =	57,16	8,23
			ζ S3 =		4,38
			η S4 =	5,02	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	3,1	0,0	0,0	3,0	4,0	0,0
2	5,0	3,1	2,0	6,9	5,8	3,1	5,00	8,0
3	15,0	3,2	4,2	20,0	15,2	3,2	7,95	20,2
4	25,0	3,4	6,8	32,0	25,1	3,4	9,47	32,2
5	35,0	3,5	8,8	43,2	35,1	3,5	10,45	43,3
6	45,0	3,6	11,3	53,6	45,0	3,6	11,08	53,7
7	55,0	3,7	14,9	63,3	55,0	3,7	11,41	63,4
8	65,0	3,9	14,3	72,4	65,0	3,9	11,44	72,4
9	75,0	4,0	12,6	80,9	75,0	4,0	11,13	80,9
10	85,0	4,1	9,2	88,9	84,9	4,1	10,27	88,8
11	95,0	4,2	12,8	96,4	94,5	4,2	7,78	96,0
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
100,0								

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 22,0	teor metálico (%) = 19,43	teor metálico (%) = 19,6
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 57,5	teor vol. Balanço fração = 47,5	teor volumétrico beta = 50,7
teor mineral % = 63,5	teor cpy balanço fração % = 56,2	teor mineral (%) = 56,6

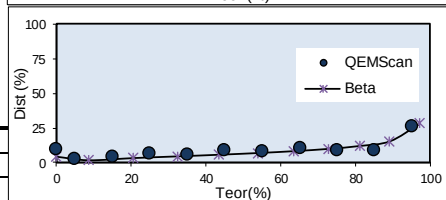
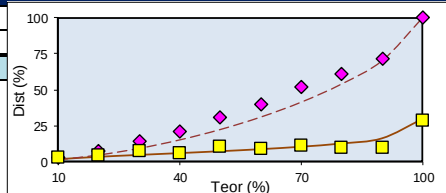
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.4 - Cal 02- Conc Rougher 1 - Fração -74+44 μ m

Ensaio	Cal 02	Fração -150 +74 μm										
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	9,9	0,0	-	-	-	-	4,1	0,00			
2	0-10	2,64	5,0	2,93	2,93	1,60	1,60	1,5	6,1			
3	10-20	3,96	15,0	4,40	7,32	4,87	3,28	3,1	15,4			
4	20-30	6,51	25,0	7,22	14,55	9,47	4,60	4,4	25,2			
5	30-40	5,66	35,0	6,29	20,83	15,33	5,86	5,6	35,2			
6	40-50	9,17	45,0	10,18	31,01	22,50	7,17	6,9	45,2			
7	50-60	8,35	55,0	9,27	40,28	31,12	8,62	8,3	55,1			
8	60-70	10,24	65,2	11,37	51,65	41,46	10,34	9,9	65,2			
9	70-80	8,55	75,0	9,49	61,14	54,06	12,60	12,1	75,2			
10	80-90	9,07	85,0	10,07	71,21	70,24	16,19	15,5	85,2			
11	90-100	25,9	95,0	28,79	100,00	100,00	29,76	28,5	96,1			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	58,5	0,6			0,7	100,00	67,5			
							0,6					
							Gama	-58,26				

Ajuste com a curva beta					
a	1,58	a ini	1,33	Dens cpy	4,3
b	0,66	b ini	0,72	Dens amostra	3,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	2,93	1,60	1,8	1,23
3	10-20	7,32	4,87	6,0	0,67
4	20-30	14,55	9,47	25,8	4,40
5	30-40	20,83	15,33	30,3	0,00
6	40-50	31,01	22,50	72,32	5,25
7	50-60	40,28	31,12	83,80	0,01
8	60-70	51,65	41,46	103,7	0,11
9	70-80	61,14	54,06	50,1	12,42
10	80-90	71,21	70,24	0,93	41,53
11	90-100	100,00	100,00	0,00	6,70
Objetivo		84,40	S2 S1 =	37,48	7,23
			ζ S3 =		6,29
			η S4 =	33,40	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	9,9	0,0	0,0	3,0	4,1	0,0
2	5,0	3,1	2,6	7,0	6,1	3,1	1,53	8,5
3	15,0	3,2	4,0	20,1	15,4	3,2	3,14	20,5
4	25,0	3,3	6,5	32,2	25,2	3,3	4,41	32,4
5	35,0	3,5	5,7	43,4	35,2	3,5	5,62	43,6
6	45,0	3,6	9,2	53,8	45,2	3,6	6,87	53,9
7	55,0	3,7	8,3	63,5	55,1	3,7	8,26	63,6
8	65,2	3,9	10,2	72,7	65,2	3,9	9,91	72,7
9	75,0	4,0	8,6	81,0	75,2	4,0	12,08	81,2
10	85,0	4,1	9,1	89,0	85,2	4,1	15,52	89,1
11	95,0	4,2	25,9	96,4	96,1	4,2	28,52	97,2
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		Relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
metal assay (%) =	21,9	metal assay (%) =	25,25	metal assay (%) =	25,0
SG other cal =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	SG other fit =	3,0
vol.grade =	58,5	target vol.grade =	65,5	vol.grade =	67,5
sample mineral % =	63,2	sample mineral % =	73,0	sample mineral % =	72,2

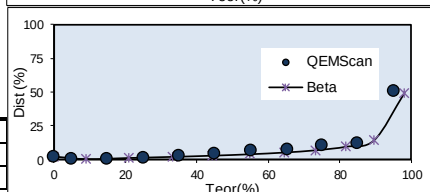
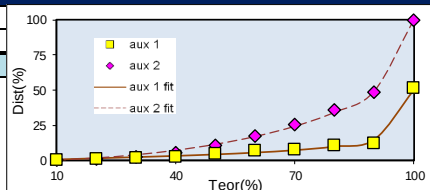
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.5 - Cal 02- Conc Rougher 1 - Fração -44+20 μ m

Ensaio	Cal 02	Conc Rougher 1		Fração -44 +20 μm								
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	2,3	0,0	-	-	-	-	2,4	0,00			
2	0-10	0,35	5,0	0,36	0,36	0,59	0,59	0,6	6,4			
3	10-20	0,76	15,0	0,78	1,14	2,06	1,46	1,4	15,5			
4	20-30	1,66	25,0	1,70	2,84	4,35	2,29	2,2	25,3			
5	30-40	2,60	35,0	2,67	5,50	7,54	3,19	3,1	35,3			
6	40-50	4,77	45,0	4,88	10,38	11,77	4,24	4,1	45,2			
7	50-60	7,06	55,0	7,23	17,62	17,30	5,53	5,4	55,2			
8	60-70	7,51	65,2	7,69	25,31	24,57	7,27	7,1	65,2			
9	70-80	10,31	75,0	10,56	35,87	34,47	9,90	9,7	75,3			
10	80-90	12,22	85,0	12,51	48,38	49,36	14,89	14,5	85,4			
11	90-100	50,4	95,0	51,62	100,00	100,00	50,64	49,4	97,2			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
	TOTAL	100,0	78,4	0,8			0,8	100,00	79,1			
				0,7			0,7					
							Gama	4,66				

Ajuste com a curva beta					
a	1,73	a ini	2,36	Dens cpy	4,3
b	0,40	b ini	0,58	Dens amostra	4,0
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	0,36	0,59	0,1	0,05
3	10-20	1,14	2,06	0,8	0,44
4	20-30	2,84	4,35	2,3	0,33
5	30-40	5,50	7,54	4,1	0,26
6	40-50	10,38	11,77	1,93	0,41
7	50-60	17,62	17,30	0,10	2,79
8	60-70	25,31	24,57	0,55	0,18
9	70-80	35,87	34,47	1,97	0,43
10	80-90	48,38	49,36	0,96	5,34
11	90-100	100,00	100,00	0,00	1,02
	Objetivo	2,47	S2 S1 =	1,28	1,13
	$\zeta =$	6	ζ S3 =		0,03
	$\eta =$	3	η S4 =	0,04	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	2,3	0,0	0,0	2,9	2,45	0,0
2	5,0	3,0	0,3	7,2	6,4	3,0	0,58	9,1
3	15,0	3,1	0,8	20,5	15,5	3,1	1,43	21,1
4	25,0	3,3	1,7	32,8	25,3	3,3	2,23	33,2
5	35,0	3,4	2,6	44,1	35,3	3,4	3,11	44,4
6	45,0	3,6	4,8	54,5	45,2	3,6	4,13	54,7
7	55,0	3,7	7,1	64,2	55,2	3,7	5,40	64,4
8	65,2	3,8	7,5	73,3	65,2	3,8	7,09	73,3
9	75,0	4,0	10,3	81,5	75,3	4,0	9,65	81,7
10	85,0	4,1	12,2	89,2	85,4	4,1	14,53	89,6
11	95,0	4,2	50,4	96,5	97,2	4,3	49,40	98,1
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	Relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 28,5	teor metálico (%) = 28,61	teor metálico (%) = 28,6
densidade outros minerais = 2,9	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 2,9
teor volumétrico = 78,4	teor vol. Balanço fração = 76,5	teor volumétrico beta = 79,1
teor mineral % = 82,5	teor cpy balanço fração % = 82,7	teor mineral (%) = 82,7

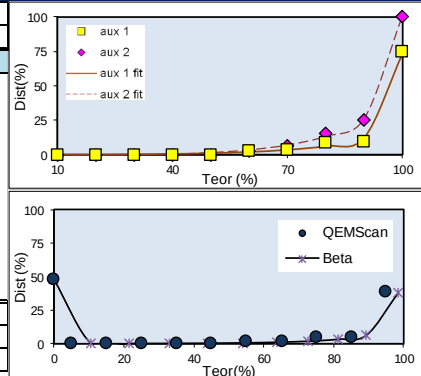
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.6 - Cal 02- Conc Rougher 1 - Fração -20 μ m

Ensaio	Cal 02	Fração -20 µm							
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa estimada (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
				mista,j	F _m mista,j	mista beta,j	beta,j		
1	0	47,8	0,0	-	-	-	-	48,0	0,00
2	0-10	0,00	5,0	0,00	0,00	0,01	0,01	0,0	7,8
3	10-20	0,00	15,0	0,00	0,00	0,06	0,06	0,0	16,3
4	20-30	0,00	25,0	0,00	0,00	0,27	0,21	0,1	25,9
5	30-40	0,00	35,0	0,00	0,00	0,78	0,51	0,3	35,7
6	40-50	0,00	45,0	0,00	0,00	1,83	1,05	0,5	45,6
7	50-60	1,52	55,0	2,92	2,92	3,78	1,96	1,0	55,5
8	60-70	1,81	65,2	3,47	6,39	7,28	3,50	1,8	65,5
9	70-80	4,72	75,0	9,04	15,43	13,57	6,29	3,3	75,5
10	80-90	5,07	85,0	9,71	25,14	25,97	12,40	6,4	85,6
11	90-100	39,1	95,0	74,86	100,00	100,00	74,03	38,5	97,9
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
	TOTAL	100,0	47,0	0,9			0,9	100,00	47,8
				0,8			0,9		
							Gama	0,40	

Ajuste com a curva beta					
ALPHA =	3,42	a ini	7,31	Dens cpy	4,3
BETA =	0,30	b ini	0,81	Dens amostra	3,6
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	0,00	0,01	0,0	0,00
3	10-20	0,00	0,06	0,0	0,00
4	20-30	0,00	0,27	0,1	0,01
5	30-40	0,00	0,78	0,6	0,07
6	40-50	0,00	1,83	3,33	0,30
7	50-60	2,92	3,78	0,75	0,25
8	60-70	6,39	7,28	0,80	0,00
9	70-80	15,43	13,57	3,44	2,09
10	80-90	25,14	25,97	0,69	1,90
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,33
	Obejtivo	1,65	S2 S1 =	0,97	0,50
	ζ =	6	ζ S3 =		0,07
	η =	3	η S4 =	0,11	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta, j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	47,8	0,0	0,0	3,0	48,0	0,0
2	5,0	3,1	0,0	6,9	7,8	3,1	0,00	10,6
3	15,0	3,2	0,0	19,9	16,3	3,3	0,03	21,6
4	25,0	3,4	0,0	32,0	25,9	3,4	0,11	33,0
5	35,0	3,5	0,0	43,2	35,7	3,5	0,26	43,9
6	45,0	3,6	0,0	53,6	45,6	3,6	0,54	54,1
7	55,0	3,7	1,5	63,3	55,5	3,7	1,02	63,8
8	65,2	3,9	1,8	72,6	65,5	3,9	1,82	72,8
9	75,0	4,0	4,7	80,9	75,5	4,0	3,27	81,3
10	85,0	4,1	5,1	88,9	85,6	4,1	6,44	89,4
11	95,0	4,2	39,1	96,4	97,9	4,3	38,48	98,5
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	Relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 16,7	teor metálico (%) = 16,8	teor metálico (%) = 16,9
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 47,0	teor vol. Balanço fração = 40,1	teor volumétrico beta = 47,8
teor mineral % = 48,2	teor cpy balanço fração % = 48,6	teor mineral (%) = 48,7

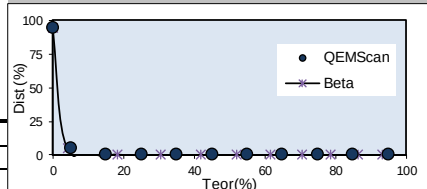
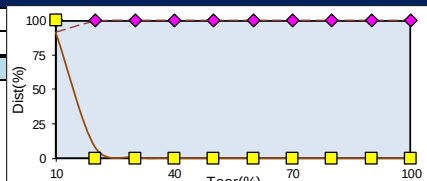
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.7 - Cal 02- Rejeito Rougher 2 - Fração +212 μ m

Ensaio	Cal 02	Rej Rg2	Fração +212 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _{m mista,j}	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _{m mista,j}	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m	Dist auxiliar simples calculada beta- f _{m mista}	Dist simples calculada beta- f _{m beta,j}	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	94,8	0,0	-	-	-	-	94,8	0,00	
2	0-10	5,23	5,0	100,00	100,00	91,33	91,33	4,8	2,9	
3	10-20	0,00	15,0	0,00	100,00	99,26	7,93	0,4	13,2	
4	20-30	0,00	25,0	0,00	100,00	99,95	0,69	0,0	23,1	
5	30-40	0,00	35,0	0,00	100,00	100,00	0,05	0,0	32,8	
6	40-50	0,00	45,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	42,6	
7	50-60	0,00	55,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	52,3	
8	60-70	0,00	65,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	61,9	
9	70-80	0,00	75,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	71,4	
10	80-90	0,00	85,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	81,1	
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	90,5	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	0,3	0,1			0,0	100,00	0,2	
				0,0						
								Gama	0,00	

Ajuste com a curva beta					
a	0,81	a ini	0,90	Dens cpy	4,3
b	20,00	b ini	1,10	Dens amostra	2,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	100,00	91,33	75,14	0,21
3	10-20	100,00	99,26	0,55	0,17
4	20-30	100,00	99,95	0,00	0,00
5	30-40	100,00	100,00	0,00	0,00
6	40-50	100,00	100,00	0,00	0,00
7	50-60	100,00	100,00	0,00	0,00
8	60-70	100,00	100,00	0,00	0,00
9	70-80	100,00	100,00	0,00	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		7,79	S2 S1 =	7,57	0,04
$\zeta =$		400	ζ S3 =		0,18
$\eta =$			η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	94,8	0,0	0,0	2,9	94,8	0,0
2	5,0	3,0	5,2	7,2	2,9	3,0	4,78	4,2
3	15,0	3,1	0,0	20,6	13,2	3,1	0,41	18,3
4	25,0	3,3	0,0	32,9	23,1	3,2	0,04	30,6
5	35,0	3,4	0,0	44,2	32,8	3,4	0,00	41,8
6	45,0	3,5	0,0	54,6	42,6	3,5	0,00	52,1
7	55,0	3,7	0,0	64,2	52,3	3,6	0,00	61,7
8	65,0	3,8	0,0	73,2	61,9	3,8	0,00	70,4
9	75,0	4,0	0,0	81,5	71,4	3,9	0,00	78,6
10	85,0	4,1	0,0	89,3	81,1	4,0	0,00	86,3
11	95,0	4,2	0,0	96,5	90,5	4,2	0,00	93,4
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 0,1	teor metálico (%) = 0,09	teor metálico (%) = 0,1
densidade outros minerais = 2,9	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 2,9
teor volumétrico = 0,3	teor vol. Balanço fração = 0,2	teor volumétrico beta = 0,2
teor mineral % = 0,4	teor cpy balanço fração % = 0,27	teor mineral (%) = 0,29

Nilce Alves dos Santos

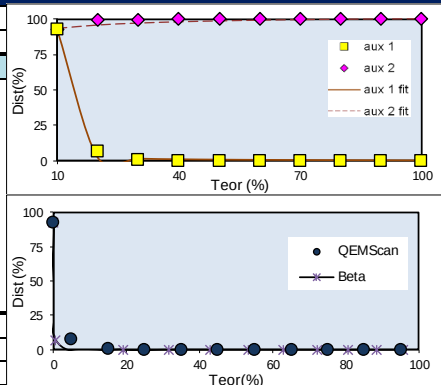
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.8 - Cal 02- Rejeito Rougher 2 - Fração -212+150 μ m

Ensaio	Cal 02	Rej Rg 2	Fração -212+150 μm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _{m mista,j}	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _{m mista,j}	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _{m mista} beta,j	Dist simples calculada beta- f _{m beta,j}	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	92,2	0,0	-	-	-	-	92,3	0,00
2	0-10	7,26	5,0	93,12	93,12	93,17	93,17	7,2	0,4
3	10-20	0,50	15,0	6,38	99,49	95,58	2,42	0,2	14,4
4	20-30	0,03	25,0	0,37	99,86	96,95	1,36	0,1	24,6
5	30-40	0,01	35,0	0,14	100,00	97,87	0,92	0,1	34,7
6	40-50	0,00	45,0	0,00	100,00	98,53	0,67	0,1	44,8
7	50-60	0,00	55,0	0,00	100,00	99,03	0,50	0,0	54,8
8	60-70	0,00	65,2	0,00	100,00	99,41	0,38	0,0	64,8
9	70-80	0,00	75,0	0,00	100,00	99,70	0,28	0,0	74,7
10	80-90	0,00	85,0	0,00	100,00	99,90	0,20	0,0	84,7
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,10	0,0	94,0
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
	TOTAL	100,0	0,4	0,1			0,0	100,00	0,2
				0,0			0,0		

Gama 0,12

Ajuste com a curva beta					
a	0,04	a ini	3,60	Dens cpy	4,3
b	1,46	b ini	58,90	Dens amostra	3,1
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	93,12	93,17	0,00	0,01
3	10-20	99,49	95,58	15,28	0,10
4	20-30	99,86	96,95	8,49	0,01
5	30-40	100,00	97,87	4,56	0,00
6	40-50	100,00	98,53	2,16	0,00
7	50-60	100,00	99,03	0,94	0,00
8	60-70	100,00	99,41	0,34	0,00
9	70-80	100,00	99,70	0,09	0,00
10	80-90	100,00	99,90	0,01	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
obj function		3,20	S2 S1 =	3,19	0,01
$\zeta =$		5	$\zeta S3 =$		0,00
$\eta =$		1	$\eta S4 =$		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,1	92,2	0,0	0,0	3,1	92,3	0,0
2	5,0	3,1	7,3	6,9	0,4	3,1	7,16	0,5
3	15,0	3,2	0,5	19,9	14,4	3,2	0,19	19,1
4	25,0	3,4	0,0	31,9	24,6	3,4	0,10	31,5
5	35,0	3,5	0,0	43,1	34,7	3,5	0,07	42,8
6	45,0	3,6	0,0	53,5	44,8	3,6	0,05	53,3
7	55,0	3,7	0,0	63,2	54,8	3,7	0,04	63,0
8	65,2	3,9	0,0	72,5	64,8	3,9	0,03	72,1
9	75,0	4,0	0,0	80,8	74,7	4,0	0,02	80,6
10	85,0	4,1	0,0	88,9	84,7	4,1	0,02	88,6
11	95,0	4,2	0,0	96,4	94,0	4,2	0,01	95,7
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,2	teor metálico (%) =	0,10	teor metálico (%) =	0,1
densidade outros minerais =	3,1	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,1
teor volumétrico =	0,4	teor vol. Balanço fração =	0,2	teor volumétrico beta =	0,2
teor mineral % =	0,6	teor cpy balanço fração % =	0,28	teor mineral (%) =	0,2

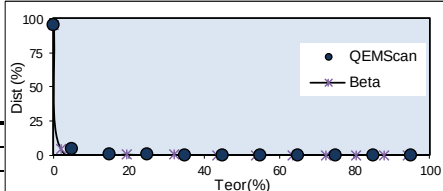
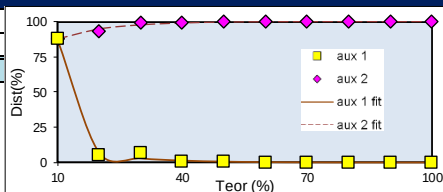
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.9 - Cal 02- Rejeito Rougher 2 - Fração -150+74 μ m

Ensaio	Cal 02	Rej Rg2	Fração -150 +74 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	95,3	0,0	-	-	-	-	95,3	0,00
2	0-10	4,17	5,0	88,02	88,02	87,54	87,54	4,1	1,3
3	10-20	0,22	15,0	4,72	92,74	94,66	7,12	0,3	14,2
4	20-30	0,30	25,0	6,41	99,15	97,62	2,96	0,1	24,3
5	30-40	0,01	35,0	0,32	99,47	98,98	1,36	0,1	34,4
6	40-50	0,03	45,0	0,53	100,00	99,61	0,62	0,0	44,3
7	50-60	0,00	55,0	0,00	100,00	99,87	0,26	0,0	54,2
8	60-70	0,00	65,0	0,00	100,00	99,97	0,10	0,0	64,1
9	70-80	0,00	75,0	0,00	100,00	100,00	0,03	0,0	73,8
10	80-90	0,00	85,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	83,2
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	91,8
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
	TOTAL	100,0	0,3	0,1			0,0	100,00	0,2
				0,0			0,0		

Ajuste com a curva beta					
a	0,18	a ini	1,17	Dens cpy	4,3
b	4,46	b ini	15,35	Dens amostra	2,9
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	88,02	87,54	0,2	0,00
3	10-20	92,74	94,66	3,7	0,01
4	20-30	99,15	97,62	2,3	0,03
5	30-40	99,47	98,98	0,2	0,00
6	40-50	100,00	99,61	0,16	0,00
7	50-60	100,00	99,87	0,02	0,00
8	60-70	100,00	99,97	0,00	0,00
9	70-80	100,00	100,00	0,00	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo	0,67025257	S2 S1 =	0,66	0,00	
$\zeta =$	5	ζ S3 =		0,00	
$\eta =$	5	η S4 =	0,00		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	95,3	0,0	0,0	2,9	95,3	0,0
2	5,0	3,0	4,2	7,2	1,3	2,9	4,15	1,9
3	15,0	3,1	0,2	20,6	14,2	3,1	0,34	19,6
4	25,0	3,3	0,3	32,9	24,3	3,3	0,14	32,1
5	35,0	3,4	0,0	44,2	34,4	3,4	0,06	43,5
6	45,0	3,5	0,0	54,6	44,3	3,5	0,03	53,9
7	55,0	3,7	0,0	64,2	54,2	3,7	0,01	63,5
8	65,0	3,8	0,0	73,2	64,1	3,8	0,00	72,4
9	75,0	4,0	0,0	81,5	73,8	3,9	0,00	80,5
10	85,0	4,1	0,0	89,3	83,2	4,1	0,00	87,9
11	95,0	4,2	0,0	96,5	91,8	4,2	0,00	94,3
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0					
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 0,2	teor metálico (%) = 0,09	teor metálico (%) = 0,1
densidade outros minerais = 2,9	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 2,9
teor volumétrico = 0,3	teor vol. Balanço fração = 0,2	teor volumétrico beta = 0,2
teor mineral % = 0,5	teor cpy balanço fração % = 0,2	teor mineral (%) = 0,2

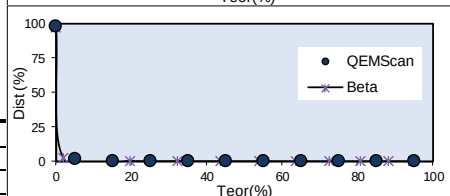
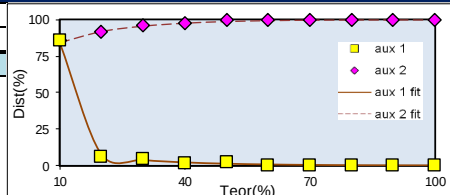
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.10 - Cal 02- Rejeito Rougher 2 - Fração -74+44 μ m

Ensaio	Cal 02	Rej Rougher 2	Fração -74 +44 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	97,6	0,0	-	-	-	-	96,9	0,00	
2	0-10	2,09	5,0	85,58	85,58	84,36	84,36	2,6	1,3	
3	10-20	0,15	15,0	5,99	91,56	92,01	7,64	0,2	14,3	
4	20-30	0,10	25,0	4,29	95,86	95,71	3,71	0,1	24,5	
5	30-40	0,04	35,0	1,75	97,61	97,75	2,03	0,1	34,5	
6	40-50	0,06	45,0	2,39	100,00	98,89	1,14	0,0	44,5	
7	50-60	0,00	55,0	0,00	100,00	99,51	0,62	0,0	54,5	
8	60-70	0,00	65,2	0,00	100,00	99,82	0,31	0,0	64,4	
9	70-80	0,00	75,0	0,00	100,00	99,96	0,13	0,0	74,2	
10	80-90	0,00	85,0	0,00	100,00	100,00	0,04	0,0	83,8	
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	92,3	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	0,2	0,1			0,0	100,00	0,2	
				0,0			0,0			
							Gama	-0,64		

Ajuste com a curva beta					
a	0,17	a ini	0,77	Dens cpy	4,3
b	3,20	b ini	8,89	Dens amostra	2,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	85,58	84,36	1,5	0,25
3	10-20	91,56	92,01	0,2	0,01
4	20-30	95,86	95,71	0,0	0,00
5	30-40	97,61	97,75	0,0	0,00
6	40-50	100,00	98,89	1,24	0,00
7	50-60	100,00	99,51	0,24	0,00
8	60-70	100,00	99,82	0,03	0,00
9	70-80	100,00	99,96	0,00	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		0,93	S2 S1 =	0,32	0,03
$\zeta =$			ζ S3 =		0,19
$\eta =$			η S4 =	0,39	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	97,6	0,0	0,0	2,9	96,9	0,0
2	5,0	3,0	2,1	7,2	1,3	2,9	2,59	1,9
3	15,0	3,1	0,1	20,6	14,3	3,1	0,23	19,7
4	25,0	3,3	0,1	32,9	24,5	3,3	0,11	32,2
5	35,0	3,4	0,0	44,2	34,5	3,4	0,06	43,6
6	45,0	3,5	0,1	54,6	44,5	3,5	0,03	54,1
7	55,0	3,7	0,0	64,2	54,5	3,7	0,02	63,7
8	65,2	3,8	0,0	73,3	64,4	3,8	0,01	72,6
9	75,0	4,0	0,0	81,5	74,2	3,9	0,00	80,8
10	85,0	4,1	0,0	89,3	83,8	4,1	0,00	88,3
11	95,0	4,2	0,0	96,5	92,3	4,2	0,00	94,7
100	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	Relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 0,09	teor metálico (%) = 0,08	teor metálico (%) = 0,07
densidade outros minerais = 2,93	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 2,93
teor volumétrico = 0,19	teor vol. Balanço fração = 0,15	teor volumétrico beta = 0,15
teor mineral % = 0,27	teor cpy balanço fração % = 0,22	teor mineral (%) = 0,20

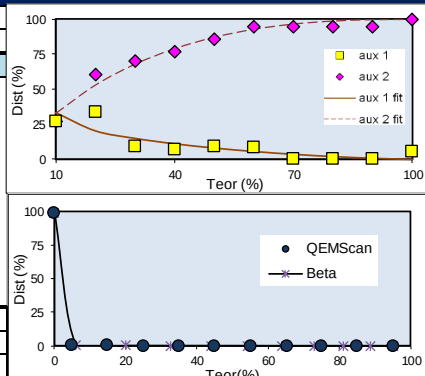
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.11 - Cal 02- Rejeito Rougher 2 - Fração -44+20 μ m

Ensaio	Cal 02	Rej Rougher 2	Fração -44 +20 μm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	98,6	0,0	-	-	-	-	98,7	0,00			
2	0-10	0,39	5,0	26,69	26,69	32,94	32,94	0,4	4,3			
3	10-20	0,49	15,0	33,83	60,51	53,10	20,17	0,3	14,7			
4	20-30	0,14	25,0	9,34	69,85	67,99	14,88	0,2	24,8			
5	30-40	0,10	35,0	6,63	76,48	79,09	11,11	0,1	34,8			
6	40-50	0,13	45,0	9,09	85,57	87,23	8,13	0,1	44,7			
7	50-60	0,13	55,0	8,70	94,27	92,94	5,72	0,1	54,7			
8	60-70	0,00	65,2	0,00	94,27	96,68	3,74	0,0	64,6			
9	70-80	0,00	75,0	0,00	94,27	98,84	2,16	0,0	74,5			
10	80-90	0,00	85,0	0,00	94,27	99,81	0,96	0,0	84,1			
11	90-100	0,1	95,0	5,73	100,00	100,00	0,19	0,0	92,8			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
	TOTAL	100,0	0,4	0,3			0,2	100,00	0,3			
				0,1			0,1					
							Gama	0,19				

Ajuste com a curva beta					
a	0,79	a ini	0,63	Dens cpy	4,3
b	2,55	b ini	1,86	Dens amostra	2,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	26,69	32,94	39,1	0,00
3	10-20	60,51	53,10	54,9	0,06
4	20-30	69,85	67,99	3,5	0,00
5	30-40	76,48	79,09	6,8	0,00
6	40-50	85,57	87,23	2,75	0,00
7	50-60	94,27	92,94	1,77	0,00
8	60-70	94,27	96,68	5,81	0,00
9	70-80	94,27	98,84	20,90	0,00
10	80-90	94,27	99,81	30,62	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,01
	Objetivo	16,62	S2 S1 =	16,61	0,01
	$\zeta =$	5	ζ S3 =		0,00
	$\eta =$		η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	98,6	0,0	0,0	2,9	98,7	0,0
2	5,0	3,0	0,4	7,2	4,3	3,0	0,42	6,2
3	15,0	3,1	0,5	20,6	14,7	3,1	0,25	20,2
4	25,0	3,3	0,1	32,9	24,8	3,3	0,19	32,6
5	35,0	3,4	0,1	44,2	34,8	3,4	0,14	43,9
6	45,0	3,5	0,1	54,6	44,7	3,5	0,10	54,3
7	55,0	3,7	0,1	64,2	54,7	3,7	0,07	63,9
8	65,2	3,8	0,0	73,4	64,6	3,8	0,05	72,8
9	75,0	4,0	0,0	81,5	74,5	3,9	0,03	81,1
10	85,0	4,1	0,0	89,3	84,1	4,1	0,01	88,6
11	95,0	4,2	0,1	96,5	92,8	4,2	0,00	95,0
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		Relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,2	teor metálico (%) =	0,15	teor metálico (%) =	0,1
densidade outros minerais =	2,9	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,9
teor volumétrico =	0,4	teor vol. Balanço fração	0,3	teor volumétrico beta =	0,3
teor mineral % =	0,4	teor cpy balanço fração % =	0,44	teor mineral (%) =	0,4

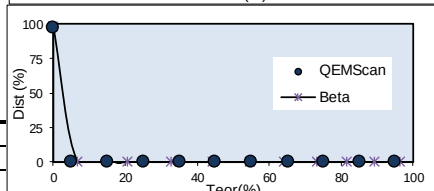
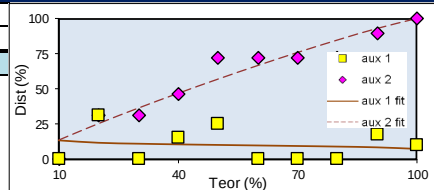
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.12 - Cal 02- Rejeito Rougher 2 - Fração -20 μ m

Ensaio	Cal 02	Rej Rg2	Fração -20 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa estimada (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	98,0	0,0	-	-	-	-	98,2	0,00
2	0-10	0,00	5,0	0,00	0,00	13,55	13,55	0,2	4,7
3	10-20	0,62	15,0	31,11	31,11	25,26	11,72	0,2	14,9
4	20-30	0,00	25,0	0,00	31,11	36,27	11,01	0,2	25,0
5	30-40	0,31	35,0	15,50	46,61	46,78	10,51	0,2	35,0
6	40-50	0,51	45,0	25,44	72,05	56,86	10,08	0,2	45,0
7	50-60	0,00	55,0	0,00	72,05	66,54	9,68	0,2	55,0
8	60-70	0,00	65,2	0,00	72,05	75,82	9,28	0,2	65,0
9	70-80	0,00	75,0	0,00	72,05	84,65	8,83	0,2	75,0
10	80-90	0,35	85,0	17,61	89,66	92,91	8,26	0,1	84,9
11	90-100	0,2	95,0	10,34	100,00	100,00	7,09	0,1	94,7
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	0,9	0,5			0,5	100,00	0,8
				0,3					
							Gama	0,18296403	

Ajuste com a curva beta					
ALPHA =	0,91	a ini	0,92	Dens cpy	4,3
BETA =	1,11	b ini	1,06	Dens amostra	2,9
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	0,00	13,55	183,6	0,06
3	10-20	31,11	25,26	34,2	0,17
4	20-30	31,11	36,27	26,7	0,04
5	30-40	46,61	46,78	0,0	0,01
6	40-50	72,05	56,86	230,72	0,11
7	50-60	72,05	66,54	30,32	0,03
8	60-70	72,05	75,82	14,24	0,03
9	70-80	72,05	84,65	158,91	0,03
10	80-90	89,66	92,91	10,59	0,04
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,01
Objetivo		68,97	S2 S1 =	68,92	0,05
$\zeta =$		5	ζ S3 =		0,00
$\eta =$			η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	97,6	0,0	0,0	2,9	98,2	0,0
2	5,0	3,0	0,0	7,2	4,7	3,0	0,25	6,8
3	15,0	3,1	0,7	20,6	14,9	3,1	0,21	20,5
4	25,0	3,3	0,0	32,9	25,0	3,3	0,20	32,9
5	35,0	3,4	0,4	44,2	35,0	3,4	0,19	44,2
6	45,0	3,5	0,6	54,6	45,0	3,5	0,18	54,6
7	55,0	3,7	0,0	64,3	55,0	3,7	0,18	64,2
8	65,2	3,8	0,0	73,4	65,0	3,8	0,17	73,2
9	75,0	4,0	0,0	81,5	75,0	4,0	0,16	81,5
10	85,0	4,1	0,5	89,3	84,9	4,1	0,15	89,2
11	95,0	4,2	0,3	96,5	94,7	4,2	0,13	96,4
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0					

Antes do ajuste beta, dados de liberação		Relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,5	teor metálico (%) =	0,3	teor metálico (%) =	0,3
densidade outros minerais =	2,9	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,9
teor volumétrico =	0,9	teor vol. Balanço fração	0,6	teor volumétrico beta =	0,8
teor mineral % =	1,4	teor cpy balanço fração % =	0,9	teor mineral (%) =	0,9

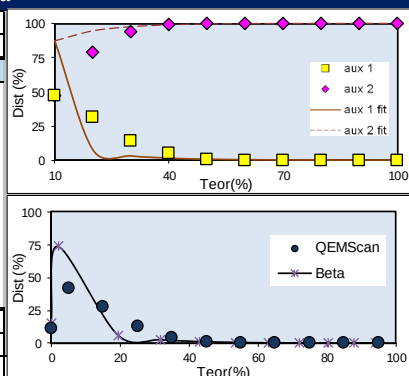
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)- Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.13 - Cal 02- Conc Scavenger 1 - Fração +212 μ m

Ensaio	Cal 02	Conc Scavenger		Fração +212 μm						
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _{mista,j}	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _{mista,j}	Dist auxiliar acumulada calculada - beta- F _{mista,j}	Dist auxiliar simples calculada - beta- f _{mista,j}	Dist simples calculada - beta- f _{mista,j}	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	11,4	0,0	-	-	-	-	15,4	0,00	
2	0-10	42,22	5,0	47,67	47,67	87,28	87,28	73,9	1,4	
3	10-20	28,15	15,0	31,78	79,45	94,56	7,28	6,2	14,2	
4	20-30	12,77	25,0	14,42	93,86	97,59	3,03	2,6	24,3	
5	30-40	4,61	35,0	5,21	99,07	98,97	1,39	1,2	34,4	
6	40-50	0,82	45,0	0,93	100,00	99,60	0,63	0,5	44,3	
7	50-60	0,00	55,0	0,00	100,00	99,87	0,27	0,2	54,2	
8	60-70	0,00	65,0	0,00	100,00	99,97	0,10	0,1	64,1	
9	70-80	0,00	75,0	0,00	100,00	100,00	0,03	0,0	73,8	
10	80-90	0,00	85,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	83,2	
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	91,6	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	11,5	0,1			0,0	100,00	3,3	
				0,0			0,0			
Gama										34,71

Ajuste com a curva beta					
a	0,18	a ini	1,55	Dens cpy	4,3
b	4,50	b ini	10,40	Dens amostra	3,0
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	47,67	87,28	1569,41	1000,45
3	10-20	79,45	94,56	228,51	483,53
4	20-30	93,86	97,59	13,86	104,28
5	30-40	99,07	98,97	0,01	11,82
6	40-50	100,00	99,60	0,16	0,08
7	50-60	100,00	99,87	0,02	0,05
8	60-70	100,00	99,97	0,00	0,01
9	70-80	100,00	100,00	0,00	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		380,40	S2 S1 =	181,20	160,02
$\zeta =$		30	ζ S3 =		23,46
$\eta =$		1	η S4 =	15,72	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada - $\beta_{mista,j}$	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	11,4	0,0	0,0	3,0	15,4	0,0
2	5,0	3,0	42,2	7,1	1,4	3,0	73,85	2,0
3	15,0	3,2	28,1	20,4	14,2	3,2	6,16	19,3
4	25,0	3,3	12,8	32,6	24,3	3,3	2,56	31,8
5	35,0	3,4	4,6	43,8	34,4	3,4	1,17	43,1
6	45,0	3,6	0,8	54,3	44,3	3,6	0,53	53,6
7	55,0	3,7	0,0	63,9	54,2	3,7	0,23	63,2
8	65,0	3,8	0,0	72,9	64,1	3,8	0,08	72,1
9	75,0	4,0	0,0	81,3	73,8	4,0	0,02	80,3
10	85,0	4,1	0,0	89,1	83,2	4,1	0,00	87,8
11	95,0	4,2	0,0	96,5	91,6	4,2	0,00	94,0
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
100,0								

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 5,3	teor metálico (%) = 1,24	teor metálico (%) = 1,5
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 11,5	teor vol. Balanço fração = 2,5	teor volumétrico beta = 3,3
teor mineral % = 15,4	teor cpy balanço fração % = 3,6	teor mineral (%) = 4,5

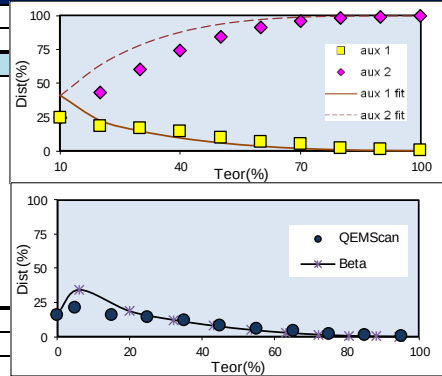
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.14 - Cal 02- Conc Scavenger 1 - Fração -212+150 μ m

Ensaio	Cal 02	Conc Scavenger	Fração -212+150 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - $f_{m\ mista,j}$	Dist auxiliar sem ganga acumulada - $F_{m\ mista,j}$	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F_m	Dist auxiliar simples calculada beta- $f_{m\ mista}$	Dist simples calculada beta- $f_{m\ mista,j}$	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	15,5	0,0	-	-	-	-	16,6	0,00	
2	0-10	20,85	5,0	24,67	24,67	41,26	41,26	34,4	4,2	
3	10-20	15,67	15,0	18,54	43,21	63,80	22,54	18,8	14,6	
4	20-30	14,30	25,0	16,92	60,13	78,49	14,69	12,2	24,6	
5	30-40	12,04	35,0	14,25	74,38	88,00	9,51	7,9	34,6	
6	40-50	8,23	45,0	9,73	84,11	93,91	5,90	4,9	44,6	
7	50-60	5,88	55,0	6,95	91,07	97,31	3,40	2,8	54,5	
8	60-70	4,25	65,2	5,03	96,09	99,05	1,74	1,5	64,4	
9	70-80	1,75	75,0	2,07	98,16	99,78	0,73	0,6	74,1	
10	80-90	1,00	85,0	1,18	99,34	99,98	0,20	0,2	83,6	
11	90-100	0,6	95,0	0,66	100,00	100,00	0,02	0,0	92,2	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
	TOTAL	100,0	23,6	0,3			0,2	100,00	15,2	
				0,1			0,1			
							Gama	7,43		

Ajuste com a curva beta					
a	0,79	a ini	1,02	Dens cpy	4,3
b	3,55	b ini	2,63	Dens amostra	3,2
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	24,67	41,26	275,2	183,52
3	10-20	43,21	63,80	423,8	9,73
4	20-30	60,13	78,49	337,1	4,21
5	30-40	74,38	88,00	185,6	16,91
6	40-50	84,11	93,91	95,97	10,91
7	50-60	91,07	97,31	39,02	9,24
8	60-70	96,09	99,05	8,76	7,83
9	70-80	98,16	99,78	2,62	1,31
10	80-90	99,34	99,98	0,41	0,69
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,29
	obj function	219,21	S2 S1 =	171,06	24,46
	$\zeta =$	30	ζ S3 =		17,06
	$\eta =$	5	η S4 =	6,62	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	15,5	0,0	0,0	3,0	16,6	0,0
2	5,0	3,0	20,9	7,1	4,2	3,0	34,40	5,9
3	15,0	3,2	15,7	20,3	14,6	3,2	18,79	19,8
4	25,0	3,3	14,3	32,5	24,6	3,3	12,25	32,1
5	35,0	3,4	12,0	43,7	34,6	3,4	7,93	43,3
6	45,0	3,6	8,2	54,1	44,6	3,6	4,92	53,7
7	55,0	3,7	5,9	63,8	54,5	3,7	2,84	63,3
8	65,2	3,8	4,3	73,0	64,4	3,8	1,45	72,3
9	75,0	4,0	1,7	81,2	74,1	4,0	0,61	80,5
10	85,0	4,1	1,0	89,1	83,6	4,1	0,17	88,1
11	95,0	4,2	0,6	96,5	92,2	4,2	0,02	94,5
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	9,9	teor metálico (%) =	6,41	teor metálico (%) =	6,7
densidade outros minerais =	3,0	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	23,6	teor vol. Balanço fração =	13,6	teor volumétrico beta =	15,2
teor mineral % =	28,7	teor cpy balanço fração % =	18,5	teor mineral (%) =	19,3

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

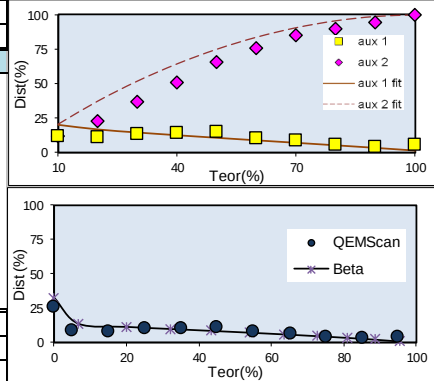
A-V.2.15 - Cal 02- Conc Scavenger 1 - Fração -150+74 μ m

Ensaio	Cal 02	Conc Scavenger		Fração -150 +74 μm					
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	11,7	0,0	-	-	-	-	14,7	0,00
2	0-10	14,23	5,0	16,12	16,12	29,78	29,78	25,4	4,6
3	10-20	12,71	15,0	14,40	30,52	51,18	21,40	18,3	14,8
4	20-30	13,63	25,0	15,45	45,97	67,37	16,18	13,8	24,8
5	30-40	13,91	35,0	15,76	61,73	79,38	12,01	10,2	34,7
6	40-50	12,76	45,0	14,46	76,19	87,96	8,58	7,3	44,7
7	50-60	7,76	55,0	8,80	84,99	93,74	5,78	4,9	54,6
8	60-70	6,34	65,0	7,18	92,17	97,30	3,56	3,0	64,5
9	70-80	3,08	75,0	3,49	95,67	99,17	1,87	1,6	74,4
10	80-90	1,81	85,0	2,06	97,72	99,89	0,72	0,6	84,0
11	90-100	2,0	95,0	2,28	100,00	100,00	0,11	0,1	92,6
	100	0,0	100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	30,8	0,3			0,2	100,00	20,6
				0,2					
							Gama	25,16	

A-V.2.16 - Cal 02- Conc Scavenger 1 - Fração -74+44 μ m

Ensaio	Cal 02	Conc Scavenger		Fração -74 +44 μm								
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	26,3	0,0	-	-	-	-	32,5	0,00			
2	0-10	8,93	5,0	12,11	12,11	20,27	20,27	13,7	4,8			
3	10-20	8,03	15,0	10,89	23,00	37,11	16,84	11,4	14,9			
4	20-30	10,03	25,0	13,61	36,61	51,70	14,58	9,8	24,9			
5	30-40	10,55	35,0	14,31	50,91	64,26	12,56	8,5	34,9			
6	40-50	10,85	45,0	14,71	65,62	74,90	10,64	7,2	44,9			
7	50-60	7,57	55,0	10,27	75,89	83,68	8,78	5,9	54,8			
8	60-70	6,55	65,2	8,88	84,77	90,61	6,93	4,7	64,8			
9	70-80	3,86	75,0	5,24	90,01	95,68	5,07	3,4	74,7			
10	80-90	3,12	85,0	4,22	94,24	98,85	3,17	2,1	84,5			
11	90-100	4,2	95,0	5,76	100,00	100,00	1,15	0,8	93,4			
100			100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	30,7	0,4			0,3	100,00	22,3			
				0,2				0,2				
							Gama	23,74				

Ajuste com a curva beta						
a	0,94	a ini	1,13	Dens cpy	4,3	
b	1,90	b ini	1,58	Dens amostra	3,2	
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	12,11	20,27	66,6	22,59	
3	10-20	23,00	37,11	199,1	11,14	
4	20-30	36,61	51,70	227,7	0,04	
5	30-40	50,91	64,26	178,1	4,28	
6	40-50	65,62	74,90	86,12	13,41	
7	50-60	75,89	83,68	60,67	2,71	
8	60-70	84,77	90,61	34,01	3,51	
9	70-80	90,01	95,68	32,09	0,19	
10	80-90	94,24	98,85	21,26	0,95	
11	90-100	100,00	100,00	0,00	12,06	
Objetivo		186,16	S2 S1 =	90,56	7,09	
$\zeta =$			ζ S3 =		49,64	
$\eta =$			η S4 =	38,87		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	26,3	0,0	0,0	3,0	32,5	0,0
2	5,0	3,1	8,9	7,0	4,8	3,1	13,68	6,7
3	15,0	3,2	8,0	20,2	14,9	3,2	11,37	20,1
4	25,0	3,3	10,0	32,4	24,9	3,3	9,84	32,3
5	35,0	3,4	10,5	43,6	34,9	3,4	8,48	43,5
6	45,0	3,6	10,8	54,0	44,9	3,6	7,19	53,9
7	55,0	3,7	7,6	63,7	54,8	3,7	5,92	63,6
8	65,2	3,8	6,6	72,9	64,8	3,8	4,68	72,6
9	75,0	4,0	3,9	81,2	74,7	4,0	3,42	80,9
10	85,0	4,1	3,1	89,1	84,5	4,1	2,14	88,7
11	95,0	4,2	4,2	96,5	93,4	4,2	0,78	95,3
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação	Relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 12,3	teor metálico (%) = 8,08	teor metálico (%) = 9,2
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 30,7	teor vol. Balanço fração = 17,5	teor volumétrico beta = 22,3
teor mineral % = 35,6	teor cpy balanço fração % = 23,4	teor mineral (%) = 26,5

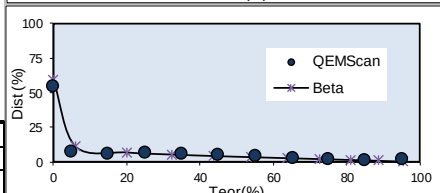
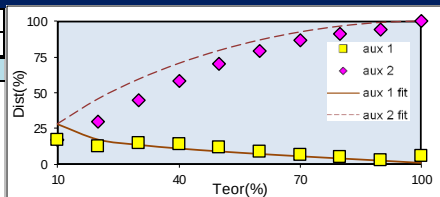
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.17 - Cal 02- Conc Scavenger 1 - Fração -44+20 μ m

Ensaio	Cal 02	Conc Scavenger		Fração -44 +20 μm								
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	54,9	0,0	-	-	-	-	59,3	0,00			
2	0-10	7,71	5,0	17,08	17,08	28,18	28,18	11,5	4,2			
3	10-20	5,71	15,0	12,65	29,74	45,57	17,38	7,1	14,8			
4	20-30	6,79	25,0	15,04	44,78	59,26	13,70	5,6	24,8			
5	30-40	6,27	35,0	13,88	58,66	70,40	11,14	4,5	34,8			
6	40-50	5,34	45,0	11,83	70,49	79,47	9,07	3,7	44,8			
7	50-60	4,08	55,0	9,03	79,52	86,75	7,28	3,0	54,8			
8	60-70	3,11	65,2	6,88	86,40	92,38	5,64	2,3	64,8			
9	70-80	2,35	75,0	5,21	91,61	96,47	4,09	1,7	74,7			
10	80-90	1,30	85,0	2,88	94,50	99,04	2,57	1,0	84,5			
11	90-100	2,5	95,0	5,50	100,00	100,00	0,96	0,4	93,5			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	17,0	0,4			0,3	100,00	11,8			
				0,2								
							Gama	8,01				

Ajuste com a curva beta					
a	0,75	a ini	0,93	Dens cpy	4,3
b	1,85	b ini	1,54	Dens amostra	3,1
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	17,08	28,18	123,2	14,23
3	10-20	29,74	45,57	250,7	1,88
4	20-30	44,78	59,26	209,8	1,47
5	30-40	58,66	70,40	137,8	2,99
6	40-50	70,49	79,47	80,62	2,70
7	50-60	79,52	86,75	52,21	1,23
8	60-70	86,40	92,38	35,80	0,65
9	70-80	91,61	96,47	23,59	0,47
10	80-90	94,50	99,04	20,61	0,07
11	90-100	100,00	100,00	0,00	4,37
Objetivo		166,78	S2 S1 =	93,43	3,01
$\zeta =$		20	ζ S3 =		31,75
$\eta =$		2	η S4 =	38,59	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	54,9	0,0	0,0	3,0	59,3	0,0
2	5,0	3,0	7,7	7,1	4,2	3,0	11,48	6,0
3	15,0	3,2	5,7	20,4	14,8	3,2	7,08	20,1
4	25,0	3,3	6,8	32,6	24,8	3,3	5,58	32,4
5	35,0	3,4	6,3	43,8	34,8	3,4	4,54	43,7
6	45,0	3,6	5,3	54,3	44,8	3,6	3,70	54,1
7	55,0	3,7	4,1	63,9	54,8	3,7	2,96	63,7
8	65,2	3,8	3,1	73,1	64,8	3,8	2,30	72,7
9	75,0	4,0	2,4	81,3	74,7	4,0	1,67	81,0
10	85,0	4,1	1,3	89,1	84,5	4,1	1,05	88,8
11	95,0	4,2	2,5	96,5	93,5	4,2	0,39	95,4
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação	Relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 6,9	teor metálico (%) = 4,45	teor metálico (%) = 4,9
densidade outros minerais = 3,0	val. metal / val. mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 17,0	teor vol. Balanço fração = 9,2	teor volumétrico beta = 11,8
teor mineral % = 19,9	teor cpy balanço fração % = 12,8	teor mineral (%) = 14,1

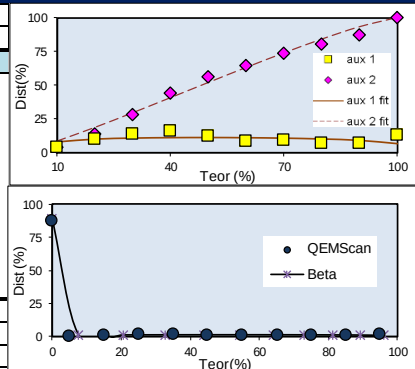
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.18 - Cal 02- Conc Scavenger 1 - Fração -20 μ m

Ensaio	Cal 02	Conc Scavenger	Fração -20 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa estimada (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	88,0	0,0	-	-	-	-	89,0	0,00
2	0-10	0,51	5,0	4,22	4,22	8,14	8,14	0,9	5,4
3	10-20	1,19	15,0	9,88	14,10	18,30	10,16	1,1	15,1
4	20-30	1,67	25,0	13,85	27,95	29,18	10,88	1,2	25,0
5	30-40	1,95	35,0	16,22	44,16	40,38	11,20	1,2	35,0
6	40-50	1,44	45,0	11,92	56,09	51,67	11,28	1,2	45,0
7	50-60	1,02	55,0	8,46	64,55	62,83	11,16	1,2	55,0
8	60-70	1,12	65,2	9,26	73,81	73,66	10,83	1,2	65,0
9	70-80	0,80	75,0	6,66	80,47	83,90	10,24	1,1	74,9
10	80-90	0,79	85,0	6,56	87,03	93,13	9,23	1,0	84,9
11	90-100	1,6	95,0	12,97	100,00	100,00	6,87	0,8	94,5
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	6,0	0,5			0,5	100,00	5,4
				0,3			0,3		
							Gama	1.23620082	

Ajuste com a curva beta					
ALPHA =	1,19	a ini	1,18	Dens cpy	4,3
BETA =	1,25	b ini	1,19	Dens amostra	3,0
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	4,22	8,14	15,4	0,15
3	10-20	14,10	18,30	17,7	0,01
4	20-30	27,95	29,18	1,5	0,23
5	30-40	44,16	40,38	14,3	0,53
6	40-50	56,09	51,67	19,52	0,04
7	50-60	64,55	62,83	2,96	0,04
8	60-70	73,81	73,66	0,02	0,01
9	70-80	80,47	83,90	11,70	0,10
10	80-90	87,03	93,13	37,12	0,05
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,65
Objetivo		12,20	S2 S1 =	12,02	0,18
$\zeta =$			ζ S3 =		0,00
$\eta =$			η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	88,0	0,0	0,0	2,9	89,0	0,0
2	5,0	3,0	0,5	7,1	5,4	3,0	0,89	7,7
3	15,0	3,1	1,2	20,5	15,1	3,1	1,11	20,6
4	25,0	3,3	1,7	32,8	25,0	3,3	1,19	32,8
5	35,0	3,4	2,0	44,0	35,0	3,4	1,23	44,1
6	45,0	3,6	1,4	54,5	45,0	3,6	1,24	54,5
7	55,0	3,7	1,0	64,1	55,0	3,7	1,22	64,1
8	65,2	3,8	1,1	73,2	65,0	3,8	1,19	73,0
9	75,0	4,0	0,8	81,4	74,9	4,0	1,12	81,4
10	85,0	4,1	0,8	89,2	84,9	4,1	1,01	89,1
11	95,0	4,2	1,6	96,5	94,5	4,2	0,75	96,1
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		Relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	2,4	teor metálico (%) =	2,1	teor metálico (%) =	2,1
densidade outros minerais =	2,9	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,9
teor volumétrico =	6,0	teor vol. Balanço fração	4,2	teor volumétrico beta =	5,4
teor mineral % =	6,8	teor cpy balanço fração % =	6,1	teor mineral (%) =	6,1

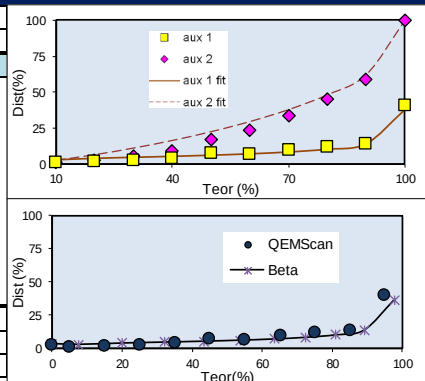
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)- Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.19 - Cal 02- Conc Cleaner - Fração -74+44 μ m

Ensaio	Cal 02	Conc Cleaner	Fração -74 +44 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada - beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada - beta- f _m mista,j	Dist simples calculada - beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	2,5	0,0	-	-	-	-	3,4	0,00	
2	0-10	0,95	5,0	0,98	0,98	2,86	2,86	2,8	5,5	
3	10-20	1,63	15,0	1,67	2,65	6,75	3,89	3,8	15,2	
4	20-30	2,38	25,0	2,44	5,09	11,34	4,59	4,4	25,1	
5	30-40	4,20	35,0	4,31	9,40	16,63	5,29	5,1	35,1	
6	40-50	7,26	45,0	7,45	16,85	22,71	6,08	5,9	45,1	
7	50-60	6,62	55,0	6,79	23,64	29,74	7,03	6,8	55,1	
8	60-70	9,45	65,2	9,69	33,33	38,06	8,32	8,0	65,2	
9	70-80	11,59	75,0	11,89	45,22	48,33	10,27	9,9	75,2	
10	80-90	13,41	85,0	13,76	58,98	62,30	13,97	13,5	85,3	
11	90-100	40,0	95,0	41,02	100,00	100,00	37,70	36,4	96,8	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
	TOTAL	100,0	73,5	0,8			0,7	100,00	69,5	
				0,6			0,6			
							Gama	34,45		

Ajuste com a curva beta					
a	1,19	a ini	1,94	Dens cpy	4,3
b	0,46	b ini	0,63	Dens amostra	3,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	0,98	2,86	3,5	3,27
3	10-20	2,65	6,75	16,8	4,52
4	20-30	5,09	11,34	39,1	4,24
5	30-40	9,40	16,63	52,3	0,84
6	40-50	16,85	22,71	34,32	1,95
7	50-60	23,64	29,74	37,24	0,03
8	60-70	33,33	38,06	22,36	1,99
9	70-80	45,22	48,33	9,65	2,79
10	80-90	58,98	62,30	11,04	0,01
11	90-100	100,00	100,00	0,00	12,72
	Objetivo	33,10	S2 S1 =	22,63	3,24
	$\zeta =$		ζ S3 =		3,46
	$\eta =$		η S4 =	3,77	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	2,5	0,0	0,0	3,0	3,4	0,0
2	5,0	3,1	1,0	6,9	5,5	3,1	2,76	7,6
3	15,0	3,2	1,6	19,9	15,2	3,2	3,76	20,1
4	25,0	3,4	2,4	32,0	25,1	3,4	4,44	32,1
5	35,0	3,5	4,2	43,2	35,1	3,5	5,11	43,3
6	45,0	3,6	7,3	53,6	45,1	3,6	5,87	53,7
7	55,0	3,7	6,6	63,3	55,1	3,7	6,80	63,4
8	65,2	3,9	9,4	72,6	65,2	3,9	8,04	72,5
9	75,0	4,0	11,6	80,9	75,2	4,0	9,92	81,1
10	85,0	4,1	13,4	88,9	85,3	4,1	13,50	89,1
11	95,0	4,2	40,0	96,4	96,8	4,3	36,42	97,7
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	Relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 26,9	teor metálico (%) = 25,25	teor metálico (%) = 25,5
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 73,5	teor vol. Balanço fração = 65,7	teor volumétrico beta = 69,5
teor mineral % = 77,8	teor cpy balanço fração % = 73,0	teor mineral (%) = 73,6

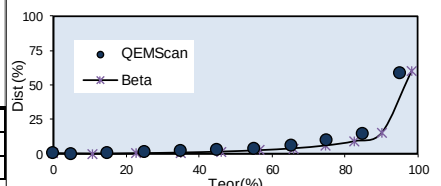
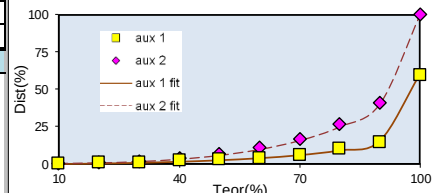
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.20 - Cal 02- Conc Cleaner - Fração -44+20 μ m

Ensaio	Cal 02	Conc Cleaner		Fração -44 +20 µm								
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	0,7	0,0	-	-	-	-	0,4	0,00			
2	0-10	0,19	5,0	0,19	0,19	0,07	0,07	0,1	7,2			
3	10-20	0,56	15,0	0,57	0,75	0,44	0,37	0,4	15,9			
4	20-30	1,11	25,0	1,11	1,87	1,30	0,86	0,9	25,6			
5	30-40	2,13	35,0	2,14	4,01	2,87	1,58	1,6	35,4			
6	40-50	2,61	45,0	2,63	6,64	5,44	2,57	2,6	45,4			
7	50-60	3,90	55,0	3,92	10,56	9,41	3,96	3,9	55,3			
8	60-70	6,03	65,2	6,08	16,64	15,39	5,99	6,0	65,3			
9	70-80	9,79	75,0	9,86	26,50	24,59	9,20	9,2	75,4			
10	80-90	14,25	85,0	14,35	40,85	40,03	15,44	15,4	85,5			
11	90-100	58,7	95,0	59,15	100,00	100,00	59,97	59,7	97,3			
100			100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	83,6	0,8			0,9	100,00	86,2			
				0,7			0,8					
							Gama	-41.18				

Ajuste com a curva beta					
a	2,55	a ini	2,85	Dens cpy	4,3
b	0,39	b ini	0,54	Dens amostra	4,1
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	0,19	0,07	0,0	0,01
3	10-20	0,75	0,44	0,1	0,04
4	20-30	1,87	1,30	0,3	0,06
5	30-40	4,01	2,87	1,3	0,31
6	40-50	6,64	5,44	1,43	0,00
7	50-60	10,56	9,41	1,33	0,00
8	60-70	16,64	15,39	1,55	0,01
9	70-80	26,50	24,59	3,62	0,39
10	80-90	40,85	40,03	0,67	1,26
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,98
Objetivo		2,04	S2 S1 =	1,03	0,31
$\zeta =$		10	ζ S3 =		0,28
$\eta =$		5	η S4 =	0,42	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,8	0,7	0,0	0,0	2,8	0,41	0,0
2	5,0	2,8	0,2	7,6	7,2	2,9	0,07	10,8
3	15,0	3,0	0,6	21,6	15,9	3,0	0,36	22,8
4	25,0	3,1	1,1	34,2	25,6	3,2	0,86	34,9
5	35,0	3,3	2,1	45,6	35,4	3,3	1,57	46,1
6	45,0	3,5	2,6	56,1	45,4	3,5	2,56	56,4
7	55,0	3,6	3,9	65,6	55,3	3,6	3,95	65,9
8	65,2	3,8	6,0	74,5	65,3	3,8	5,96	74,6
9	75,0	3,9	9,8	82,4	75,4	3,9	9,16	82,7
10	85,0	4,1	14,3	89,8	85,5	4,1	15,37	90,2
11	95,0	4,2	58,7	96,7	97,3	4,3	59,73	98,3
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		Relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	30,3	teor metálico (%) =	31,10	teor metálico (%) =	31,0
densidade outros minerais =	2,8	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,8
teor volumétrico =	83,6	teor vol. Balanço fração =	85,1	teor volumétrico beta =	86,2
teor mineral % =	87,7	teor cpy balanço fração % =	89,9	teor mineral (%) =	89,7

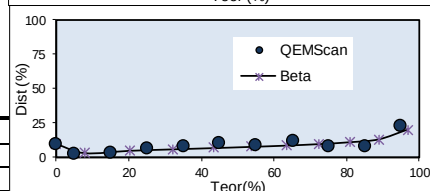
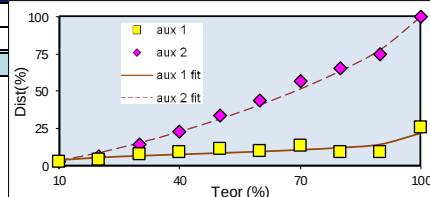
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.21 - Cal 02- Rej Cleaner - Fração -74+44 μ m

Ensaio	Cal 02	Rej Cleaner	Fração -74 +44 µm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,beta,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	9,8	0,0	-	-	-	-	9,7	0,00			
2	0-10	2,56	5,0	2,83	2,83	3,58	3,58	3,2	5,7			
3	10-20	3,28	15,0	3,64	6,47	8,99	5,41	4,9	15,2			
4	20-30	6,58	25,0	7,30	13,77	15,53	6,54	5,9	25,1			
5	30-40	7,84	35,0	8,69	22,46	23,04	7,51	6,8	35,1			
6	40-50	10,26	45,0	11,38	33,84	31,50	8,47	7,6	45,1			
7	50-60	8,96	55,0	9,93	43,77	40,98	9,47	8,6	55,1			
8	60-70	11,83	65,2	13,11	56,88	51,60	10,62	9,6	65,1			
9	70-80	7,91	75,0	8,77	65,65	63,70	12,10	10,9	75,1			
10	80-90	7,88	85,0	8,73	74,38	78,06	14,36	13,0	85,2			
11	90-100	23,1	95,0	25,62	100,00	100,00	21,94	19,8	95,8			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	56,9	0,6			0,6	100,00	57,4			
				0,5				0,5				

Ajuste com a curva beta					
a	1,30	a ini	1,43	Dens cpy	4,3
b	0,75	b ini	0,84	Dens amostra	3,7
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	2,83	3,58	0,6	0,46
3	10-20	6,47	8,99	6,3	2,57
4	20-30	13,77	15,53	3,1	0,46
5	30-40	22,46	23,04	0,3	1,11
6	40-50	33,84	31,50	5,43	6,84
7	50-60	43,77	40,98	7,80	0,16
8	60-70	56,88	51,60	27,89	4,98
9	70-80	65,65	63,70	3,80	9,13
10	80-90	74,38	78,06	13,55	25,98
11	90-100	100,00	100,00	0,00	10,84
Objetivo		13,26	S2 S1 =	6,88	6,25
$\zeta =$			ζ S3 =		0,05
$\eta =$			η S4 =	0,08	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	9,8	0,0	0,0	3,0	9,7	0,0
2	5,0	3,1	2,6	6,9	5,7	3,1	3,23	7,8
3	15,0	3,2	3,3	20,0	15,2	3,2	4,88	20,2
4	25,0	3,4	6,6	32,0	25,1	3,4	5,91	32,2
5	35,0	3,5	7,8	43,2	35,1	3,5	6,79	43,3
6	45,0	3,6	10,3	53,6	45,1	3,6	7,65	53,7
7	55,0	3,7	9,0	63,3	55,1	3,7	8,56	63,4
8	65,2	3,9	11,8	72,6	65,1	3,9	9,60	72,5
9	75,0	4,0	7,9	80,9	75,1	4,0	10,93	81,0
10	85,0	4,1	7,9	88,9	85,2	4,1	12,97	89,0
11	95,0	4,2	23,1	96,4	95,8	4,2	19,82	97,0
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0					

Antes do ajuste beta, dados de liberação	Relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 21,4	teor metálico (%) = 21,54	teor metálico (%) = 21,5
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 56,9	teor vol. Balanço fração = 53,9	teor volumétrico beta = 57,4
teor mineral % = 61,8	teor cpy balanço fração % = 62,3	teor mineral (%) = 62,2

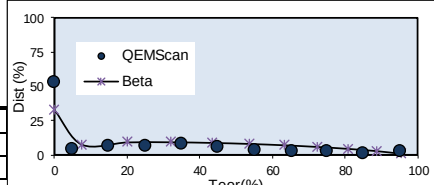
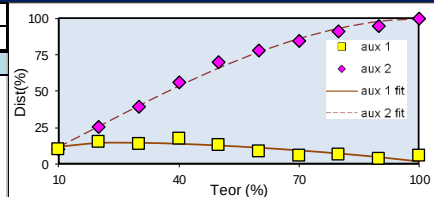
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.2.22 - Cal 02- Rej Cleaner - Fração -44+20 μ m

Ensaio	Cal 02	Rej Cleaner	Fração -44 +20 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	53,0	0,0	-	-	-	-	32,8	0,00	
2	0-10	4,82	5,0	10,24	10,24	11,66	11,66	7,8	5,4	
3	10-20	7,08	15,0	15,05	25,30	25,77	14,11	9,5	15,0	
4	20-30	6,42	25,0	13,65	38,95	39,99	14,22	9,6	25,0	
5	30-40	8,22	35,0	17,47	56,42	53,56	13,57	9,1	34,9	
6	40-50	6,29	45,0	13,38	69,80	66,01	12,45	8,4	44,9	
7	50-60	3,96	55,0	8,41	78,21	76,99	10,98	7,4	54,9	
8	60-70	2,85	65,2	6,07	84,28	86,20	9,21	6,2	64,8	
9	70-80	3,16	75,0	6,71	90,98	93,35	7,15	4,8	74,7	
10	80-90	1,70	85,0	3,61	94,59	98,12	4,77	3,2	84,6	
11	90-100	2,5	95,0	5,41	100,00	100,00	1,88	1,3	93,5	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	18,9	0,4			0,4	100,00	26,7	
				0,2			0,2			
							Gama	-38.04		

Ajuste com a curva beta					
a	1,22	a ini	1,12	Dens cpy	4,3
b	1,84	b ini	1,67	Dens amostra	3,3
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	10,24	11,66	2,0	9,11
3	10-20	25,30	25,77	0,2	5,76
4	20-30	38,95	39,99	1,1	9,82
5	30-40	56,42	53,56	8,1	0,81
6	40-50	69,80	66,01	14,32	4,29
7	50-60	78,21	76,99	1,47	11,70
8	60-70	84,28	86,20	3,71	11,11
9	70-80	90,98	93,35	5,60	2,72
10	80-90	94,59	98,12	12,41	2,26
11	90-100	100,00	100,00	0,00	1,63
Objetivo		10,94	S2 S1 =	4,90	5,92
$\zeta =$		5	ζ S3 =		0,11
$\eta =$			η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	53,0	0,0	0,0	3,0	32,8	0,0
2	5,0	3,1	4,8	7,0	5,4	3,1	7,84	7,5
3	15,0	3,2	7,1	20,1	15,0	3,2	9,48	20,1
4	25,0	3,3	6,4	32,2	25,0	3,3	9,55	32,2
5	35,0	3,5	8,2	43,4	34,9	3,5	9,12	43,3
6	45,0	3,6	6,3	53,8	44,9	3,6	8,36	53,7
7	55,0	3,7	4,0	63,5	54,9	3,7	7,38	63,4
8	65,2	3,9	2,9	72,7	64,8	3,8	6,19	72,4
9	75,0	4,0	3,2	81,0	74,7	4,0	4,80	80,8
10	85,0	4,1	1,7	89,0	84,6	4,1	3,20	88,6
11	95,0	4,2	2,5	96,4	93,5	4,2	1,26	95,4
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		Relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	7,6	teor metálico (%) =	10,81	teor metálico (%) =	10,8
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	18,9	teor vol. Balanço fração	24,2	teor volumétrico beta =	26,7
teor mineral % =	21,9	teor cpy balanço fração % =	31,3	teor mineral (%) =	31,1

Nilce Alves dos Santos

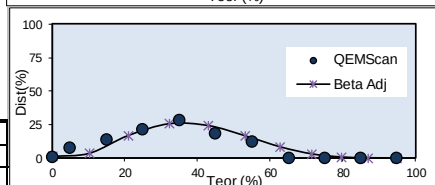
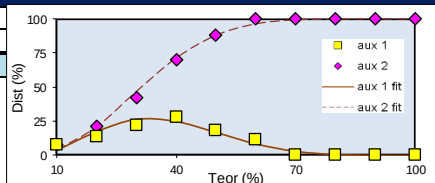
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3 - Ensaio Cal 03

A-V.3.1 - Cal 03- Conc Rougher 1 - Fração +212 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Rg1	Fração +212 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	0,3	0,0	-	-	-	-	1,0	0,00
2	0-10	7,4	5,0	7,46	7,46	3,46	3,46	3,4	7,4
3	10-20	13,2	15,0	13,28	20,75	20,48	17,02	16,8	15,7
4	20-30	21,4	25,0	21,50	42,24	46,58	26,10	25,8	25,1
5	30-40	27,9	35,0	27,99	70,24	71,19	24,61	24,4	34,8
6	40-50	18,1	45,0	18,12	88,36	87,92	16,73	16,6	44,6
7	50-60	11,6	55,0	11,64	100,00	96,34	8,41	8,3	54,3
8	60-70	0,0	65,2	0,00	100,00	99,31	2,97	2,9	64,0
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,00	99,94	0,64	0,6	73,5
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,06	0,1	82,6
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	93,0
	100	0,0	100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL							0,3	100,00	32,1
				0,1			0,1		
							Gama	223,0	

Ajuste com a curva beta					
a	3,25	aini	3,21	Dens cpy	4,30
b	6,76	bini	6,79	Dens amostra	3,4
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	7,46	3,46	16,03	16,12
3	10-20	20,75	20,48	0,07	13,00
4	20-30	42,24	46,58	18,80	19,36
5	30-40	70,24	71,19	0,90	12,62
6	40-50	88,36	87,92	0,19	2,26
7	50-60	100,00	96,34	13,43	10,73
8	60-70	100,00	99,31	0,48	8,65
9	70-80	100,00	99,94	0,00	0,40
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
obj function		15,45	S2 S1 =	4,99	8,31
$\zeta =$		2	ζ S3 =	1,64	
$\eta =$		1	η S4 =	0,51	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe									
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)	
1	0,0	3,0	0,3	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	
2	5,0	3,1	7,4	6,9	7,4	3,1	3,4	10,2	
3	15,0	3,2	13,2	20,0	15,7	3,2	16,8	20,9	
4	25,0	3,3	21,4	32,1	25,1	3,4	25,8	32,2	
5	35,0	3,5	27,9	43,3	34,8	3,5	24,4	43,1	
6	45,0	3,6	18,1	53,7	44,6	3,6	16,6	53,3	
7	55,0	3,7	11,6	63,4	54,3	3,7	8,3	62,7	
8	65,2	3,9	0,0	72,7	64,0	3,8	2,9	71,6	
9	75,0	4,0	0,0	81,0	73,5	4,0	0,6	79,7	
10	85,0	4,1	0,0	88,9	82,6	4,1	0,1	87,1	
11	95,0	4,2	0,0	96,4	93,0	4,2	0,0	95,0	
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0	
100,0				100,0					

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 13,6	teor metálico (%) = 13,31	teor metálico (%) = 13,6
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 32,0	teor vol. Balanço fração = 30,6	teor volumétrico beta = 32,1
teor mineral % = 39,2	teor cpy balanço fração % = 38,5	teor mineral (%) = 39,4

Nilce Alves dos Santos

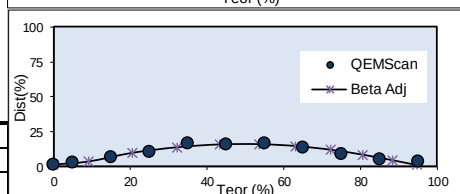
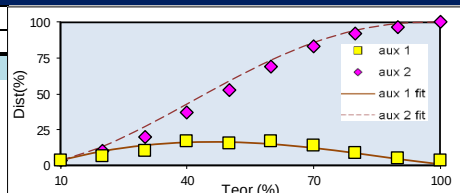
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.2 - Cal 03- Conc Rougher 1 - Fração -212+150 μ m

Ensaio Cal 03		Conc Rougher 1		Fração -212 +150µm					
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	1,0	0,0	-	-	-	-	1,6	0,00
2	0-10	3,2	5,0	3,19	3,19	3,77	3,77	3,7	6,6
3	10-20	6,6	15,0	6,63	9,82	13,61	9,84	9,7	15,4
4	20-30	10,2	25,0	10,31	20,13	27,39	13,78	13,6	25,2
5	30-40	16,6	35,0	16,73	36,86	43,13	15,74	15,5	35,1
6	40-50	15,5	45,0	15,62	52,48	59,06	15,93	15,7	45,0
7	50-60	16,5	55,0	16,65	69,13	73,65	14,59	14,4	54,9
8	60-70	13,7	65,0	13,80	82,93	85,66	12,01	11,8	64,8
9	70-80	8,8	75,0	8,87	91,79	94,20	8,54	8,4	74,6
10	80-90	4,9	85,0	4,98	96,78	98,85	4,65	4,6	84,3
11	90-100	3,2	95,0	3,22	100,00	100,00	1,15	1,1	93,0
			100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	48,2	0,5			0,5	100,00	44,4
				0.3			0.2		

Gama = 59,00

Ajuste com a curva beta					
a	2,01	aini	2,12	Dens mineral	4,30
b	2,45	bini	2,23	Dens amostra	3,6
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	3,19	3,77	0,33	0,30
3	10-20	9,82	13,61	14,34	9,73
4	20-30	20,13	27,39	52,62	11,23
5	30-40	36,86	43,13	39,25	1,15
6	40-50	52,48	59,06	43,29	0,05
7	50-60	69,13	73,65	20,48	4,49
8	60-70	82,93	85,66	7,50	3,39
9	70-80	91,79	94,20	5,79	0,14
10	80-90	96,78	98,85	4,29	0,13
11	90-100	100,00	100,00	0,00	4,23
Objetivo		25,60	S2 S1 =	18,79	3,48
$\zeta =$		20	ζ S3 =		1,60
$\eta =$		5	η S4 =	1,73	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	3,0	1,6	0,0
2	5,0	3,1	3,2	6,9	6,6	3,1	3,7	9,0
3	15,0	3,2	6,6	19,9	15,4	3,2	9,7	20,5
4	25,0	3,4	10,2	32,0	25,2	3,4	13,6	32,2
5	35,0	3,5	16,6	43,2	35,1	3,5	15,5	43,2
6	45,0	3,6	15,5	53,6	45,0	3,6	15,7	53,5
7	55,0	3,7	16,5	63,3	54,9	3,7	14,4	63,2
8	65,0	3,9	13,7	72,4	64,8	3,9	11,8	72,2
9	75,0	4,0	8,8	80,9	74,6	4,0	8,4	80,6
10	85,0	4,1	4,9	88,9	84,3	4,1	4,6	88,3
11	95,0	4,2	3,2	96,4	93,0	4,2	1,1	94,9
	100,0	4,3			100,0	4,3		
			100,0				100,0	51,3

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =		19,1	teor metálico (%) =	17,6	teor metálico (%) =
densidade outros minerais =		3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =
teor volumétrico =		48,2	teor vol. Balanço fração	42,4	teor volumétrico beta =
teor mineral % =		55,1	ou mineral balanço fração %	51,0	teor mineral (%) =
					51,3

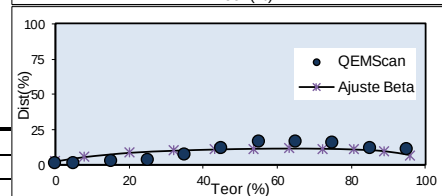
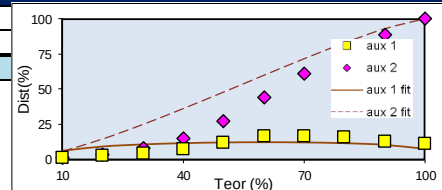
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.3 - Cal 03- Conc Rougher 1 - Fração -150+74 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Rougher 1	Fração -150 +74µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	0,9	0,0	-	-	-	-	2,5	0,00
2	0-10	1,3	5,0	1,27	1,27	5,76	5,76	5,6	5,8
3	10-20	2,5	15,0	2,56	3,83	14,61	8,85	8,6	15,2
4	20-30	3,9	25,0	3,96	7,79	24,95	10,33	10,1	25,1
5	30-40	7,2	35,0	7,26	15,05	36,17	11,23	10,9	35,1
6	40-50	11,8	45,0	11,88	26,93	47,90	11,73	11,4	45,0
7	50-60	16,7	55,0	16,86	43,79	59,80	11,90	11,6	55,0
8	60-70	16,7	65,0	16,82	60,61	71,55	11,75	11,5	65,0
9	70-80	15,5	75,0	15,68	76,29	82,76	11,20	10,9	74,9
10	80-90	12,3	85,0	12,38	88,67	92,81	10,06	9,8	84,9
11	90-100	11,2	95,0	11,33	100,00	100,00	7,19	7,0	94,4
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	62,0	0,6			0,5	100,00	50,1
				0,4			0,3		

Ajuste com a curva beta					
a	1,37	aini	2,53	Dens cpy	4,30
b	1,30	bini	1,51	Dens amostra	3,6
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	1,27	5,76	20,19	19,03
3	10-20	3,83	14,61	116,26	37,12
4	20-30	7,79	24,95	294,34	37,86
5	30-40	15,05	36,17	446,20	14,10
6	40-50	26,93	47,90	439,86	0,11
7	50-60	43,79	59,80	256,57	25,94
8	60-70	60,61	71,55	119,75	27,13
9	70-80	76,29	82,76	41,84	21,22
10	80-90	88,67	92,81	17,22	6,02
11	90-100	100,00	100,00	0,00	17,82
Objetivo		225,76	S2 S1 =	175,22	20,63
$\zeta =$		17	ζ S3 =		15,48
$\eta =$		6	η S4 =	14,42	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	0,9	0,0	0,0	3,0	2,5	0,0
2	5,0	3,1	1,3	6,9	5,8	3,1	5,6	7,9
3	15,0	3,2	2,5	20,0	15,2	3,2	8,6	20,2
4	25,0	3,4	3,9	32,0	25,1	3,4	10,1	32,1
5	35,0	3,5	7,2	43,2	35,1	3,5	10,9	43,3
6	45,0	3,6	11,8	53,6	45,0	3,6	11,4	53,6
7	55,0	3,7	16,7	63,3	55,0	3,7	11,6	63,3
8	65,0	3,9	16,7	72,4	65,0	3,9	11,5	72,4
9	75,0	4,0	15,5	80,9	74,9	4,0	10,9	80,9
10	85,0	4,1	12,3	88,9	84,9	4,1	9,8	88,8
11	95,0	4,2	11,2	96,4	94,4	4,2	7,0	96,0
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) =	23,6	teor metálico (%) =	19,11
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35
teor volumétrico =	62,0	teor vol. Balanço fração =	46,6
teor mineral % =	68,2	teor cpy balanço fração % =	55,2
		teor metálico (%) =	19,4
		densidade outros minerais =	3,0
		teor volumétrico beta =	50,1
		teor mineral (%) =	56,2

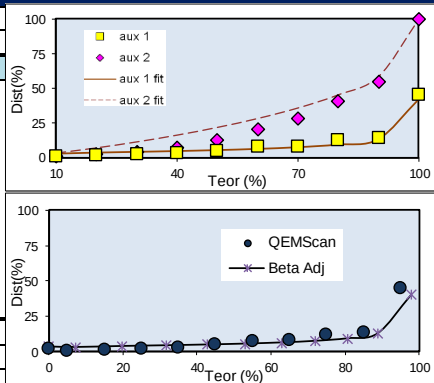
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.4 - Cal 03- Conc Rougher 1 - Fração -74+44 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Rg1		Fração -74 +44µm									
Dados de entrada e funções auxiliares													
bin		mass%		aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)				
1	0	2,1	0,0	-	-	-	-	3,3	0,00				
2	0-10	0,6	5,0	0,64	0,64	3,05	3,05	2,9	5,3				
3	10-20	1,4	15,0	1,47	2,12	6,84	3,79	3,7	15,1				
4	20-30	2,0	25,0	1,99	4,11	11,17	4,33	4,2	25,1				
5	30-40	3,1	35,0	3,12	7,23	16,08	4,91	4,7	35,1				
6	40-50	4,9	45,0	5,03	12,26	21,66	5,58	5,4	45,1				
7	50-60	7,6	55,0	7,76	20,02	28,09	6,44	6,2	55,1				
8	60-70	7,9	65,0	8,08	28,10	35,73	7,63	7,4	65,2				
9	70-80	12,1	75,0	12,38	40,48	45,24	9,51	9,2	75,2				
10	80-90	13,8	85,0	14,07	54,55	58,47	13,24	12,8	85,4				
11	90-100	44,5	95,0	45,45	100,00	100,00	41,53	40,2	97,1				
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00				
TOTAL		100,0	76,4	0,8			0,7	100,00	70,9				
				0,7			0,6						

Ajuste com a curva beta					
a	1,11	aini	2,16	Dens cpy	4,30
b	0,40	bini	0,61	Dens amostra	3,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	0,64	3,05	5,79	5,38
3	10-20	2,12	6,84	22,31	4,94
4	20-30	4,11	11,17	49,86	5,01
5	30-40	7,23	16,08	78,26	2,86
6	40-50	12,26	21,66	88,26	0,22
7	50-60	20,02	28,09	65,25	1,86
8	60-70	28,10	35,73	58,15	0,28
9	70-80	40,48	45,24	22,61	8,53
10	80-90	54,55	58,47	15,37	0,94
11	90-100	100,00	100,00	0,00	18,68
Objetivo		58,44	S2 S1 =	40,59	4,87
$\zeta =$		10	ζ S3 =		6,15
$\eta =$		5	η S4 =	6,83	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,1	2,1	0,0	0,0	3,1	3,3	0,0
2	5,0	3,2	0,6	6,8	5,3	3,2	2,9	7,2
3	15,0	3,3	1,4	19,6	15,1	3,3	3,7	19,7
4	25,0	3,4	2,0	31,5	25,1	3,4	4,2	31,6
5	35,0	3,5	3,1	42,6	35,1	3,5	4,7	42,7
6	45,0	3,6	4,9	53,0	45,1	3,7	5,4	53,1
7	55,0	3,8	7,6	62,8	55,1	3,8	6,2	62,9
8	65,0	3,9	7,9	71,9	65,2	3,9	7,4	72,1
9	75,0	4,0	12,1	80,5	75,2	4,0	9,2	80,7
10	85,0	4,1	13,8	88,7	85,4	4,1	12,8	88,9
11	95,0	4,2	44,5	96,3	97,1	4,3	40,2	97,9
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 27,7	teor metálico (%) = 25,51	teor metálico (%) = 25,8
densidade outros minerais = 3,1	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,1
teor volumétrico = 76,4	teor vol. Balanço fração = 67,0	teor volumétrico beta = 70,9
teor mineral % = 80,1	teor cpy balanço fração % = 73,7	teor mineral (%) = 74,5

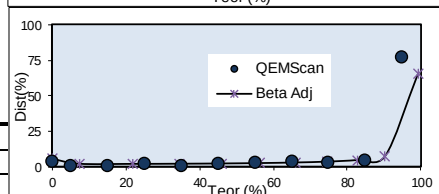
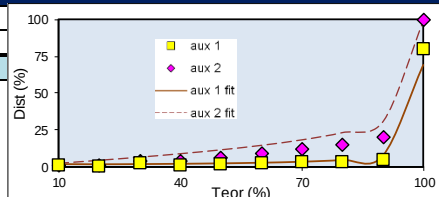
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.5 - Cal 03- Conc Rougher 1 - Fração -44+20 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Rg1	Fração -44 +20 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	3,9	0,0	-	-	-	-	5,5	0,00
2	0-10	0,6	5,0	0,62	0,62	2,14	2,14	2,0	4,8
3	10-20	0,5	15,0	0,53	1,15	4,17	2,04	1,9	15,0
4	20-30	2,3	25,0	2,38	3,53	6,33	2,15	2,0	25,1
5	30-40	0,6	35,0	0,64	4,17	8,68	2,35	2,2	35,1
6	40-50	1,8	45,0	1,84	6,01	11,32	2,64	2,5	45,1
7	50-60	2,6	55,0	2,74	8,74	14,39	3,07	2,9	55,1
8	60-70	3,2	65,2	3,38	12,12	18,14	3,75	3,5	65,2
9	70-80	2,9	75,0	3,04	15,16	23,09	4,95	4,7	75,3
10	80-90	4,7	85,0	4,87	20,04	30,79	7,69	7,3	85,5
11	90-100	76,8	95,0	79,96	100,00	100,00	69,21	65,4	98,7
	100		100,0	-	-	-	-		100,00
TOTAL		100,0	84,4	0,9			0,9	100,00	81,0
				0,8			0,8		

Ajuste com a curva beta					
a	0,90	a ini	2,15	Dens cpy	4,30
b	0,15	b ini	0,30	Dens amostra	4,0
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	0,62	2,14	2,30	2,03
3	10-20	1,15	4,17	9,14	2,00
4	20-30	3,53	6,33	7,82	0,06
5	30-40	4,17	8,68	20,33	2,58
6	40-50	6,01	11,32	28,20	0,53
7	50-60	8,74	14,39	31,91	0,08
8	60-70	12,12	18,14	36,28	0,09
9	70-80	15,16	23,09	62,85	3,07
10	80-90	20,04	30,79	115,51	6,70
11	90-100	100,00	100,00	0,00	130,24
obj funtor		57,59	S2 S1 =	31,43	14,74
$\zeta =$		6	ζ S3 =		6,47
$\eta =$		2	η S4 =	4,95	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,7	3,9	0,0	0,0	2,7	5,5	0,0
2	5,0	2,8	0,6	7,7	4,8	2,8	2,0	7,4
3	15,0	3,0	0,5	21,7	15,0	3,0	1,9	21,8
4	25,0	3,1	2,3	34,4	25,1	3,1	2,0	34,5
5	35,0	3,3	0,6	45,9	35,1	3,3	2,2	46,0
6	45,0	3,4	1,8	56,3	45,1	3,4	2,5	56,4
7	55,0	3,6	2,6	65,8	55,1	3,6	2,9	65,9
8	65,2	3,8	3,2	74,7	65,2	3,8	3,5	74,7
9	75,0	3,9	2,9	82,5	75,3	3,9	4,7	82,7
10	85,0	4,1	4,7	89,9	85,5	4,1	7,3	90,3
11	95,0	4,2	76,8	96,8	98,7	4,3	65,4	99,2
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	30,2	teor metálico (%) =	29,26	teor metálico (%) =
densidade outros minerais =	2,7	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =
teor volumétrico =	84,4	teor vol. Balanço fração =	77,7	teor volumétrico beta =
teor mineral % =	87,3	teor cpy balanço fração % =	84,6	teor mineral (%) =
				83,5

Nilce Alves dos Santos

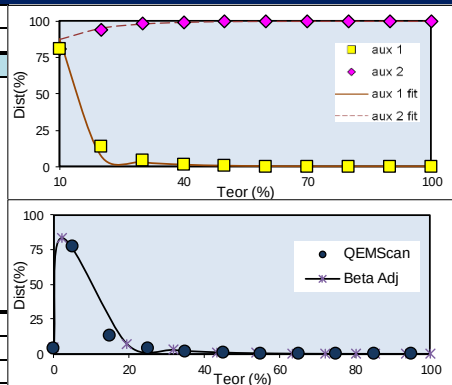
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.6 - Cal 03- Conc Scavenger - Fração +212 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Scavenger	Fração +212 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	4,1	0,0	-	-	-	-	4,8	0,00
2	0-10	77,2	5,0	80,52	80,52	87,67	87,67	83,5	1,5
3	10-20	13,0	15,0	13,54	94,06	95,26	7,59	7,2	14,1
4	20-30	3,8	25,0	3,95	98,01	98,13	2,87	2,7	24,3
5	30-40	1,2	35,0	1,30	99,31	99,31	1,17	1,1	34,3
6	40-50	0,5	45,0	0,48	99,79	99,77	0,47	0,4	44,2
7	50-60	0,2	55,0	0,21	100,00	99,94	0,17	0,2	54,1
8	60-70	0,0	65,2	0,00	100,00	99,99	0,05	0,0	63,9
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,00	100,00	0,01	0,0	73,6
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	80,0
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	91,0
	100	0,0	100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	7,5	0,1			0,0	100,00	3,6
				0,0			0,0		

Gama 18,2

Ajuste com a curva beta					
a	0,21	aini	1,15	Dens cpy	4,30
b	5,37	bini	13,56	Dens amostra	3,0
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	80,52	87,67	51,14	38,56
3	10-20	94,06	95,26	1,45	33,20
4	20-30	98,01	98,13	0,01	1,13
5	30-40	99,31	99,31	0,00	0,02
6	40-50	99,79	99,77	0,00	0,00
7	50-60	100,00	99,94	0,00	0,00
8	60-70	100,00	99,99	0,00	0,00
9	70-80	100,00	100,00	0,00	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
obj function		15,29	S2 S1 =	5,26	7,29
$\zeta =$		10	ζ S3 =		2,19
$\eta =$		1	η S4 =	0,55	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	4,1	0,0	0,0	2,9	4,8	0,0
2	5,0	3,0	77,2	7,2	1,5	3,0	83,5	2,2
3	15,0	3,1	13,0	20,5	14,1	3,1	7,2	19,4
4	25,0	3,3	3,8	32,8	24,3	3,3	2,7	31,9
5	35,0	3,4	1,2	44,1	34,3	3,4	1,1	43,3
6	45,0	3,6	0,5	54,5	44,2	3,5	0,4	53,7
7	55,0	3,7	0,2	64,1	54,1	3,7	0,2	63,3
8	65,2	3,8	0,0	73,3	63,9	3,8	0,0	72,2
9	75,0	4,0	0,0	81,5	73,6	3,9	0,0	80,3
10	85,0	4,1	0,0	89,2	80,0	4,0	0,0	85,4
11	95,0	4,2	0,0	96,5	91,0	4,2	0,0	93,7
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
				100,0			100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	3,6	teor metálico (%) =	1,55	teor metálico (%) =	1,7
densidade outros minerais =	2,9	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,9
teor volumétrico =	7,5	teor vol. Balanço fração =	3,1	teor volumétrico beta =	3,6
teor mineral % =	10,4	teor cpy balanço fração % =	4,5	teor mineral (%) =	4,9

Nilce Alves dos Santos

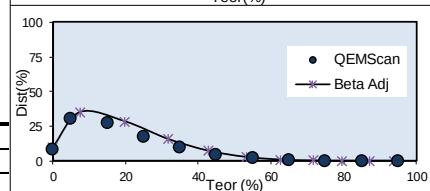
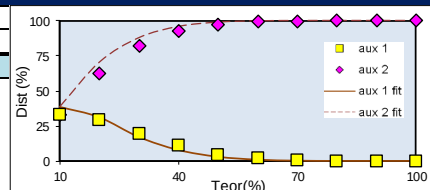
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.7 - Cal 03- Conc Scavenger - Fração -212+150 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Scavenger	Fração -212 +150µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	8,5	0,0	-	-	-	-	10,1	0,00
2	0-10	30,3	5,0	33,13	33,13	38,99	38,99	35,1	5,3
3	10-20	27,0	15,0	29,52	62,65	70,57	31,57	28,4	14,6
4	20-30	17,6	25,0	19,27	81,92	87,89	17,33	15,6	24,4
5	30-40	10,0	35,0	10,94	92,86	95,82	7,93	7,1	34,3
6	40-50	4,0	45,0	4,34	97,19	98,85	3,02	2,7	44,1
7	50-60	1,7	55,0	1,90	99,09	99,77	0,92	0,8	53,9
8	60-70	0,7	65,0	0,73	99,82	99,97	0,20	0,2	63,6
9	70-80	0,1	75,0	0,06	99,88	100,00	0,03	0,0	73,1
10	80-90	0,1	85,0	0,09	99,97	100,00	0,00	0,0	82,3
11	90-100	0,0	95,0	0,03	100,00	100,00	0,00	0,0	91,2
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	16,8	0,2			0,2	100,00	14,0
				0.1			0.0		

Gama 19,0

Ajuste com a curva beta					
a	1,37	aini	1,34	Dens cpy	4,30
b	7,41	bini	5,94	Dens amostra	3,2
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	33,13	38,99	34,36	22,46
3	10-20	62,65	70,57	62,71	1,89
4	20-30	81,92	87,89	35,68	4,24
5	30-40	92,86	95,82	8,78	8,31
6	40-50	97,19	98,85	2,73	1,56
7	50-60	99,09	99,77	0,45	0,83
8	60-70	99,82	99,97	0,02	0,23
9	70-80	99,88	100,00	0,01	0,00
10	80-90	99,97	100,00	0,00	0,01
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		23,53	S2 S1 =	14,48	3,95
$\zeta =$		20	ζ S3 =		2,51
$\eta =$		1	η S4 =	2,59	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	8,5	0,0	0,0	3,0	10,1	0,0
2	5,0	3,1	30,3	7,0	5,3	3,1	35,1	7,4
3	15,0	3,2	27,0	20,3	14,6	3,2	28,4	19,7
4	25,0	3,3	17,6	32,4	24,4	3,3	15,6	31,8
5	35,0	3,4	10,0	43,7	34,3	3,4	7,1	42,9
6	45,0	3,6	4,0	54,1	44,1	3,6	2,7	53,2
7	55,0	3,7	1,7	63,8	53,9	3,7	0,8	62,7
8	65,0	3,8	0,7	72,8	63,6	3,8	0,2	71,6
9	75,0	4,0	0,1	81,2	73,1	3,9	0,0	79,7
10	85,0	4,1	0,1	89,1	82,3	4,1	0,0	87,0
11	95,0	4,2	0,0	96,5	91,2	4,2	0,0	93,7
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
				100,0			100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	7,5	teor metálico (%) =	6,22	teor metálico (%) =
densidade outros minerais =	3,0	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =
teor volumétrico =	16,8	teor vol. Balanço fração =	13,2	teor volumétrico beta =
teor mineral % =	21,6	teor cpy balanço fração % =	18,0	teor mineral (%) =

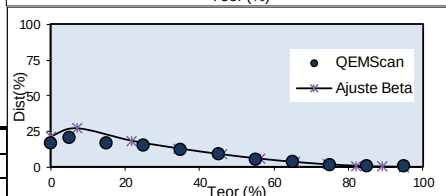
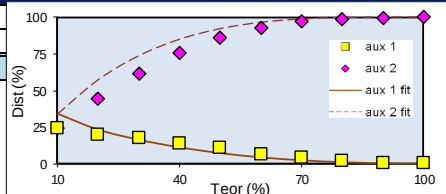
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.8 - Cal 03- Conc Scavenger - Fração -150+74 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Scavenger	Fração -150 +74µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	16,4	0,0	-	-	-	-	21,2	0,00
2	0-10	20,6	5,0	24,66	24,66	34,17	34,17	26,9	4,6
3	10-20	16,3	15,0	19,46	44,12	57,41	23,24	18,3	14,7
4	20-30	14,8	25,0	17,72	61,85	73,76	16,35	12,9	24,7
5	30-40	11,7	35,0	14,04	75,88	84,91	11,15	8,8	34,7
6	40-50	8,9	45,0	10,63	86,51	92,12	7,21	5,7	44,6
7	50-60	5,2	55,0	6,24	92,76	96,43	4,31	3,4	54,5
8	60-70	3,6	65,0	4,26	97,02	98,71	2,28	1,8	64,4
9	70-80	1,4	75,0	1,67	98,69	99,69	0,98	0,8	74,2
10	80-90	0,6	85,0	0,68	99,38	99,97	0,28	0,2	83,7
11	90-100	0,5	95,0	0,62	100,00	100,00	0,03	0,0	92,2
	100		100,0	-	-	-	-		100,00
TOTAL		100,00	22,5	0,3			0,2	100,00	16,5
				0,1			0,1		

Ajuste com a curva beta					
a	0,93	aini	1,08	Dens cpy	4,30
b	3,51	bini	2,93	Dens amostra	2,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	24,66	34,17	90,38	39,53
3	10-20	44,12	57,41	176,60	4,13
4	20-30	61,85	73,76	141,96	3,78
5	30-40	75,88	84,91	81,51	8,73
6	40-50	86,51	92,12	31,49	10,29
7	50-60	92,76	96,43	13,51	3,34
8	60-70	97,02	98,71	2,86	3,13
9	70-80	98,69	99,69	1,00	0,39
10	80-90	99,38	99,97	0,36	0,12
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,25
Objetivo		104,93	S2 S1 =	53,97	7,37
ζ =		5	ζ S3 =		27,04
η =		0,7	η S4 =	16,56	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,7	16,4	0,0	0,0	2,7	21,2	0,0
2	5,0	2,8	20,6	7,8	4,6	2,8	26,9	7,1
3	15,0	2,9	16,3	22,0	14,7	2,9	18,3	21,6
4	25,0	3,1	14,8	34,8	24,7	3,1	12,9	34,4
5	35,0	3,3	11,7	46,3	34,7	3,2	8,8	45,9
6	45,0	3,4	8,9	56,7	44,6	3,4	5,7	56,3
7	55,0	3,6	5,2	66,2	54,5	3,6	3,4	65,7
8	65,0	3,7	3,6	74,8	64,4	3,7	1,8	74,3
9	75,0	3,9	1,4	82,8	74,2	3,9	0,8	82,1
10	85,0	4,1	0,6	90,1	83,7	4,0	0,2	89,1
11	95,0	4,2	0,5	96,8	92,2	4,2	0,0	95,0
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3		100,0

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 10,1	teor metálico (%) = 6,80	teor metálico (%) = 7,6
densidade outros minerais = 2,7	val. metal / val. mineral = 0,35	densidade outros minerais = 2,7
teor volumétrico = 22,5	teor vol. Balanço fração = 13,2	teor volumétrico beta = 16,5
teor mineral % = 29,1	teor cpy balanço fração % = 19,6	teor mineral (%) = 22,0

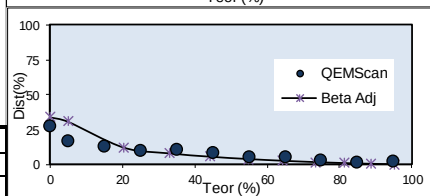
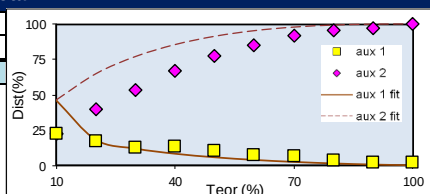
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)- Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.9 - Cal 03- Conc Scavenger - Fração -74+44 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Scavenger		Fração -74 +44µm								
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	27,1	0,0	-	-	-	-	34,1	0,00			
2	0-10	16,4	5,0	22,52	22,52	46,66	46,66	30,8	3,5			
3	10-20	12,9	15,0	17,68	40,20	65,06	18,41	12,1	14,6			
4	20-30	9,5	25,0	13,00	53,19	77,13	12,07	8,0	24,7			
5	30-40	10,1	35,0	13,86	67,05	85,51	8,38	5,5	34,7			
6	40-50	7,9	45,0	10,88	77,94	91,34	5,83	3,8	44,7			
7	50-60	5,3	55,0	7,30	85,23	95,29	3,95	2,6	54,7			
8	60-70	4,8	65,0	6,57	91,80	97,80	2,52	1,7	64,6			
9	70-80	2,8	75,0	3,81	95,61	99,23	1,43	0,9	74,5			
10	80-90	1,4	85,0	1,87	97,48	99,87	0,63	0,4	84,1			
11	90-100	1,8	95,0	2,52	100,00	100,00	0,13	0,1	92,8			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	23,3	0,3			0,2	100,00	12,1			
				0,2			0,1					
							Gama	25.78				

Ajuste com a curva beta					
a	0,56	aini	0,89	Dens cpy	4,30
b	2,50	bini	1,89	Dens amostra	3,0
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	22,52	46,66	582,74	205,80
3	10-20	40,20	65,06	618,16	0,57
4	20-30	53,19	77,13	572,99	2,30
5	30-40	67,05	85,51	340,57	21,00
6	40-50	77,94	91,34	179,59	16,74
7	50-60	85,23	95,29	101,09	7,38
8	60-70	91,80	97,80	36,06	9,79
9	70-80	95,61	99,23	13,17	3,36
10	80-90	97,48	99,87	5,72	0,90
11	90-100	100,00	100,00	0,00	3,08
Objetivo		371,71	S2 S1 =	245,01	27,09
$\zeta =$		15	ζ S3 =	50,88	
$\eta =$		1	η S4 =	48,73	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	27,1	0,0	0,0	2,9	34,1	0,0
2	5,0	2,9	16,4	7,3	3,5	2,9	30,8	5,1
3	15,0	3,1	12,9	20,9	14,6	3,1	12,1	20,4
4	25,0	3,2	9,5	33,3	24,7	3,2	8,0	33,0
5	35,0	3,4	10,1	44,7	34,7	3,4	5,5	44,4
6	45,0	3,5	7,9	55,1	44,7	3,5	3,8	54,8
7	55,0	3,7	5,3	64,7	54,7	3,6	2,6	64,4
8	65,0	3,8	4,8	73,6	64,6	3,8	1,7	73,2
9	75,0	3,9	2,8	81,8	74,5	3,9	0,9	81,4
10	85,0	4,1	1,4	89,5	84,1	4,1	0,4	88,8
11	95,0	4,2	1,8	96,6	92,8	4,2	0,1	95,1
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação			relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	9,8		teor metálico (%) =	4,67	teor metálico (%) =	5,3
densidade outros minerais =	2,9		val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,9
teor volumétrico =	23,3		teor vol. Balanço fração	9,4	teor volumétrico beta =	12,1
teor mineral % =	28,2		teor cpy balanço fração % =	13,5	teor mineral (%) =	15,3

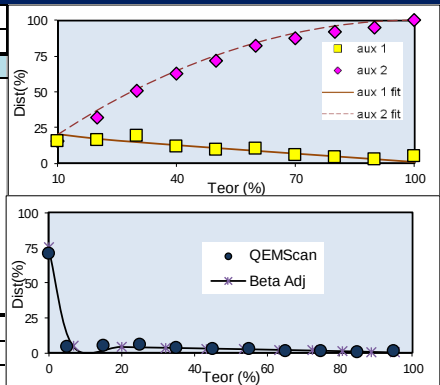
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.10 - Cal 03- Conc Scavenger - Fração -44+20 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Scavenger	Fração -44 +20 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f_m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F_m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F_m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f_m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	70,5	0,0	-	-	-	-	75,0	0,00
2	0-10	4,5	5,0	15,27	15,27	20,24	20,24	5,1	4,8
3	10-20	4,9	15,0	16,52	31,79	37,27	17,02	4,3	14,9
4	20-30	5,7	25,0	19,15	50,94	52,02	14,75	3,7	24,9
5	30-40	3,5	35,0	11,69	62,63	64,69	12,67	3,2	34,9
6	40-50	2,7	45,0	9,22	71,85	75,38	10,69	2,7	44,8
7	50-60	3,0	55,0	10,31	82,16	84,13	8,75	2,2	54,8
8	60-70	1,7	65,2	5,59	87,75	90,98	6,84	1,7	64,8
9	70-80	1,3	75,0	4,34	92,09	95,92	4,94	1,2	74,7
10	80-90	0,9	85,0	2,95	95,04	98,95	3,03	0,8	84,5
11	90-100	1,5	95,0	4,96	100,00	100,00	1,05	0,3	93,4
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
	TOTAL	100,0	10,6	0,4			0,3	100,00	8,2
				0,2			0,2		
							Gama	6,44	

Ajuste com a curva beta					
a	0,95	a ini	0,93	Dens cpy	4,30
b	1,95	b ini	1,65	Dens amostra	3,1
	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	15,27	20,24	24,71	0,30
3	10-20	31,79	37,27	30,02	0,39
4	20-30	50,94	52,02	1,17	3,87
5	30-40	62,63	64,69	4,24	0,08
6	40-50	71,85	75,38	12,45	0,00
7	50-60	82,16	84,13	3,87	0,74
8	60-70	87,75	90,98	10,39	0,00
9	70-80	92,09	95,92	14,67	0,00
10	80-90	95,04	98,95	15,24	0,01
11	90-100	100,00	100,00	0,00	1,44
obj function		39,94	S2 S1 =	11,68	0,68
	$\zeta =$	20	ζ S3 =		6,95
	$\eta =$	1	η S4 =	20,63	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	70,5	0,0	0,0	3,0	75,0	0,0
2	5,0	3,1	4,5	7,0	4,8	3,1	5,1	6,7
3	15,0	3,2	4,9	20,1	14,9	3,2	4,3	20,0
4	25,0	3,3	5,7	32,2	24,9	3,3	3,7	32,1
5	35,0	3,5	3,5	43,4	34,9	3,5	3,2	43,3
6	45,0	3,6	2,7	53,8	44,8	3,6	2,7	53,7
7	55,0	3,7	3,0	63,5	54,8	3,7	2,2	63,4
8	65,2	3,9	1,7	72,8	64,8	3,8	1,7	72,4
9	75,0	4,0	1,3	81,1	74,7	4,0	1,2	80,8
10	85,0	4,1	0,9	89,0	84,5	4,1	0,8	88,6
11	95,0	4,2	1,5	96,4	93,4	4,2	0,3	95,3
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	4,3	teor metálico (%) =	3,16	teor metálico (%) =	3,4
densidade outros minerais =	3,0	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	10,6	teor vol. Balanço fração =	6,6	teor volumétrico beta =	8,2
teor mineral % =	12,4	teor cpy balanço fração % =	9,1	teor mineral (%) =	9,7

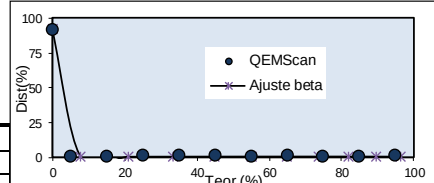
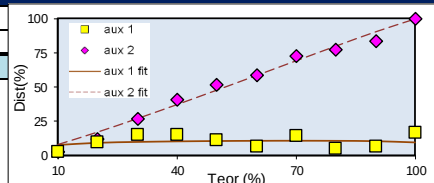
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.11 - Cal 03- Conc Scavenger - Fração -20 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Scavenger	Fração -20 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	91,7	0,0	-	-	-	-	91,9	0,00
2	0-10	0,2	5,0	2,22	2,22	7,49	7,49	0,6	5,4
3	10-20	0,8	15,0	9,41	11,63	16,68	9,20	0,7	15,1
4	20-30	1,2	25,0	14,66	26,29	26,59	9,91	0,8	25,0
5	30-40	1,2	35,0	14,53	40,82	36,93	10,34	0,8	35,0
6	40-50	0,9	45,0	11,01	51,83	47,56	10,62	0,9	45,0
7	50-60	0,6	55,0	6,65	58,48	58,35	10,79	0,9	55,0
8	60-70	1,1	65,2	13,72	72,21	69,19	10,85	0,9	65,0
9	70-80	0,4	75,0	4,82	77,03	79,97	10,78	0,9	75,0
10	80-90	0,5	85,0	6,19	83,21	90,48	10,51	0,9	85,0
11	90-100	1,4	95,0	16,79	100,00	100,00	9,52	0,8	94,8
	100		100,0	-	-	-	-		100,00
	TOTAL	100,0	4,4	0,5			0,5	100,00	4,2
				0,4			0,3		
							Gama	0,2	

Ajuste com a curva beta					
a	1,16	a ini	1,20	Dens cpy	4,30
b	1,09	b ini	1,08	Dens amostra	2,9
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	2,22	7,49	27,72	0,18
3	10-20	11,63	16,68	25,54	0,00
4	20-30	26,29	26,59	0,09	0,17
5	30-40	40,82	36,93	15,06	0,14
6	40-50	51,83	47,56	18,22	0,00
7	50-60	58,48	58,35	0,02	0,10
8	60-70	72,21	69,19	9,09	0,07
9	70-80	77,03	79,97	8,66	0,23
10	80-90	83,21	90,48	52,84	0,12
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,39
Objetivo		16,01	S2 S1 =	15,72	0,14
$\zeta =$		1	ζ S3 =		0,11
$\eta =$		1	η S4 =	0,04	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,9	91,7	0,0	0,0	2,9	91,86	0,0
2	5,0	2,9	0,2	7,3	5,4	2,9	0,61	7,9
3	15,0	3,1	0,8	21,0	15,1	3,1	0,75	21,1
4	25,0	3,2	1,2	33,4	25,0	3,2	0,81	33,5
5	35,0	3,4	1,2	44,8	35,0	3,4	0,84	44,8
6	45,0	3,5	0,9	55,2	45,0	3,5	0,86	55,2
7	55,0	3,7	0,6	64,8	55,0	3,7	0,88	64,8
8	65,2	3,8	1,1	73,8	65,0	3,8	0,88	73,7
9	75,0	3,9	0,4	81,9	75,0	3,9	0,88	81,9
10	85,0	4,1	0,5	89,5	85,0	4,1	0,86	89,5
11	95,0	4,2	1,4	96,6	94,8	4,2	0,77	96,5
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	1,7	teor metálico (%) =	1,54	teor metálico (%) =	1,7
densidade outros minerais =	2,9	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,9
teor volumétrico =	4,4	teor vol. Balanço fração =	3,0	teor volumétrico beta =	4,2
teor mineral % =	5,0	teor cpy balanço fração % =	4,4	teor mineral (%) =	4,8

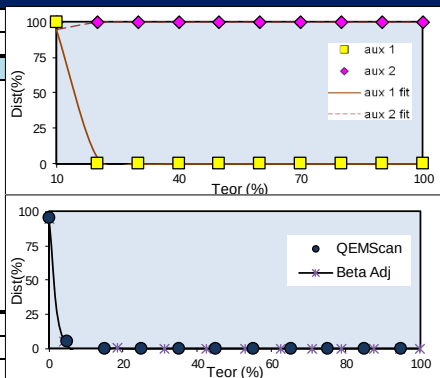
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.12 - Cal 03- Rejeito Scavenger - Fração +212 μ m

Ensaio	Cal 03	Rej Scavenger	Fração +212 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	95,0	0,0	-	-	-	-	94,4	0,00
2	0-10	5,0	5,0	100,00	100,00	94,77	94,77	5,3	2,8
3	10-20	0,0	15,0	0,00	100,00	99,77	5,00	0,3	12,8
4	20-30	0,0	25,0	0,00	100,00	99,99	0,22	0,0	22,6
5	30-40	0,0	35,0	0,00	100,00	100,00	0,01	0,0	32,4
6	40-50	0,0	45,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	42,1
7	50-60	0,0	55,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	51,8
8	60-70	0,0	65,2	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	61,5
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	70,8
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	82,0
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	92,0
	100	0,0	100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	0,2	0,05			0,0	100,00	0,2
				0,00			0,0		
							Gama	-0,7	

Ajuste com a curva beta					
a	0,90	aini	0,8	Dens cpy	4,30
b	26,20	bini	25	Dens amostra	2,8
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	100,00	94,77	27,35	0,11
3	10-20	100,00	99,77	0,05	0,08
4	20-30	100,00	99,99	0,00	0,00
5	30-40	100,00	100,00	0,00	0,00
6	40-50	100,00	100,00	0,00	0,00
7	50-60	100,00	100,00	0,00	0,00
8	60-70	100,00	100,00	0,00	0,00
9	70-80	100,00	100,00	0,00	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
obj function		2,78	S2 S1 =	2,74	0,02
$\zeta =$		10	ζ S3 =		0,02
$\eta =$			η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- $f_{mista,j}$	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,8	95,0	0,0	0,0	2,8	94,4	0,0
2	5,0	2,9	5,0	7,5	2,8	2,8	5,3	4,2
3	15,0	3,0	0,0	21,3	12,8	3,0	0,3	18,4
4	25,0	3,2	0,0	33,9	22,6	3,1	0,0	31,0
5	35,0	3,3	0,0	45,3	32,4	3,3	0,0	42,4
6	45,0	3,5	0,0	55,7	42,1	3,4	0,0	52,8
7	55,0	3,6	0,0	65,3	51,8	3,6	0,0	62,3
8	65,2	3,8	0,0	74,2	61,5	3,7	0,0	71,0
9	75,0	3,9	0,0	82,2	70,8	3,9	0,0	78,8
10	85,0	4,1	0,0	89,7	82,0	4,0	0,0	87,5
11	95,0	4,2	0,0	96,7	92,0	4,2	0,0	94,6
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0					

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,1	teor metálico (%) =	0,12	teor metálico (%) =	0,1
densidade outros minerais =	2,8	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,8
teor volumétrico =	0,2	teor vol. Balanço fração =	0,2	teor volumétrico beta =	0,2
teor mineral % =	0,3	teor cpy balanço fração % =	0,35	teor mineral (%) =	0,3

Nilce Alves dos Santos

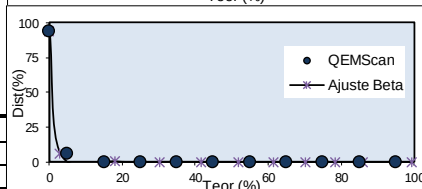
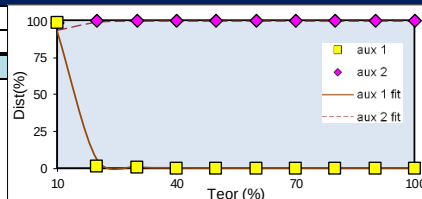
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.13 - Cal 03- Rejeito Scavenger - Fração -212+150 μ m

Ensaio	Cal 03	Rej Scavenger	Fração -212 +150µm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	93,7	0,0	-	-	-	-	93,8	0,00	
2	0-10	6,2	5,0	98,50	98,50	93,22	93,22	5,8	2,1	
3	10-20	0,1	15,0	1,12	99,62	99,16	5,95	0,4	13,4	
4	20-30	0,0	25,0	0,38	100,00	99,91	0,75	0,0	23,3	
5	30-40	0,0	35,0	0,00	100,00	99,99	0,08	0,0	33,2	
6	40-50	0,0	45,0	0,00	100,00	100,00	0,01	0,0	43,0	
7	50-60	0,0	55,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	52,7	
8	60-70	0,0	65,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	62,3	
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	71,8	
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	81,2	
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	99,0	
	100			-	-	-	-	0,0	100,00	
	TOTAL	100,0	0,3	0,1			0,0	100,00	0,2	
				0,0			0,0			

Gama 0,1

Ajuste com a curva beta					
a	0,47	aini	9,74	Dens cpy	4,30
b	15,41	bini	178,00	Dens amostra	3,0
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	98,50	93,22	27,94	0,18
3	10-20	99,62	99,16	0,21	0,09
4	20-30	100,00	99,91	0,01	0,00
5	30-40	100,00	99,99	0,00	0,00
6	40-50	100,00	100,00	0,00	0,00
7	50-60	100,00	100,00	0,00	0,00
8	60-70	100,00	100,00	0,00	0,00
9	70-80	100,00	100,00	0,00	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		2,85	S2 S1 =	2,82	0,03
$\zeta =$		5	ζ S3 =		0,00
$\eta =$		1	η S4 =	0,01	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	93,7	0,0	0,0	3,0	93,8	0,0
2	5,0	3,1	6,2	7,0	2,1	3,0	5,8	3,0
3	15,0	3,2	0,1	20,2	13,4	3,2	0,4	18,2
4	25,0	3,3	0,0	32,3	23,3	3,3	0,0	30,4
5	35,0	3,5	0,0	43,6	33,2	3,4	0,0	41,6
6	45,0	3,6	0,0	54,0	43,0	3,6	0,0	52,0
7	55,0	3,7	0,0	63,7	52,7	3,7	0,0	61,5
8	65,0	3,8	0,0	72,7	62,3	3,8	0,0	70,3
9	75,0	4,0	0,0	81,1	71,8	3,9	0,0	78,5
10	85,0	4,1	0,0	89,0	81,2	4,1	0,0	86,1
11	95,0	4,2	0,0	96,5	99,0	4,3	0,0	99,3
	0,0	3,0		0,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,2	teor metálico (%) =	0,09	teor metálico (%) =	0,1
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	0,3	teor vol. Balanço fração =	0,2	teor volumétrico beta =	0,2
teor mineral % =	0,5	teor cpy balanço fração % =	0,3	teor mineral (%) =	0,3

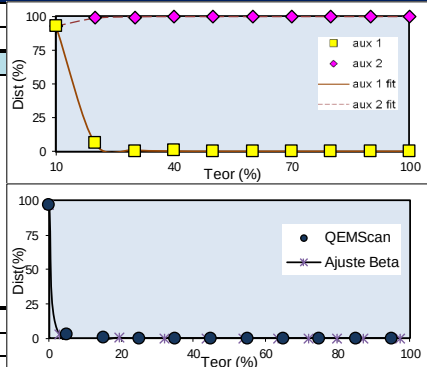
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.14 - Cal 03- Rejeito Scavenger - Fração -150+74 μ m

Ensaio	Cal 03	Rej Scavenger	Fração -150 +74µm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	96,8	0,0	-	-	-	-	96,8	0,00			
2	0-10	3,0	5,0	93,02	93,02	92,98	92,98	3,0	1,8			
3	10-20	0,2	15,0	5,96	98,99	98,83	5,86	0,2	13,6			
4	20-30	0,0	25,0	0,00	98,99	99,82	0,99	0,0	23,6			
5	30-40	0,0	35,0	1,01	100,00	99,98	0,16	0,0	33,5			
6	40-50	0,0	45,0	0,00	100,00	100,00	0,02	0,0	43,3			
7	50-60	0,0	55,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	53,0			
8	60-70	0,0	65,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	62,6			
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	72,1			
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	81,5			
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	96,0			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	0,2	0,1			0,0	100,00	0,1			
				0,0			0,0					
							Gama =	0,0				

Ajuste com a curva beta					
a	0,36	aini	2,23	Dens cpy	4,30
b	12,50	bini	35,64	Dens amostra	2,8
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	93,02	92,98	0,00	0,00
3	10-20	98,99	98,83	0,02	0,00
4	20-30	98,99	99,82	0,70	0,00
5	30-40	100,00	99,98	0,00	0,00
6	40-50	100,00	100,00	0,00	0,00
7	50-60	100,00	100,00	0,00	0,00
8	60-70	100,00	100,00	0,00	0,00
9	70-80	100,00	100,00	0,00	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		0,08	S2 S1 =	0,07	0,00
ζ =		10	ζ S3 =		0,01
η =		5	η S4 =	0,00	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,8	96,8	0,0	0,0	2,8	96,8	0,0
2	5,0	2,9	3,0	7,5	1,8	2,8	3,0	2,8
3	15,0	3,0	0,2	21,3	13,6	3,0	0,2	19,4
4	25,0	3,2	0,0	33,9	23,6	3,2	0,0	32,2
5	35,0	3,3	0,0	45,3	33,5	3,3	0,0	43,6
6	45,0	3,5	0,0	55,7	43,3	3,4	0,0	54,0
7	55,0	3,6	0,0	65,3	53,0	3,6	0,0	63,4
8	65,0	3,8	0,0	74,1	62,6	3,7	0,0	72,0
9	75,0	3,9	0,0	82,2	72,1	3,9	0,0	79,9
10	85,0	4,1	0,0	89,7	81,5	4,0	0,0	87,1
11	95,0	4,2	0,0	96,7	96,0	4,2	0,0	97,4
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

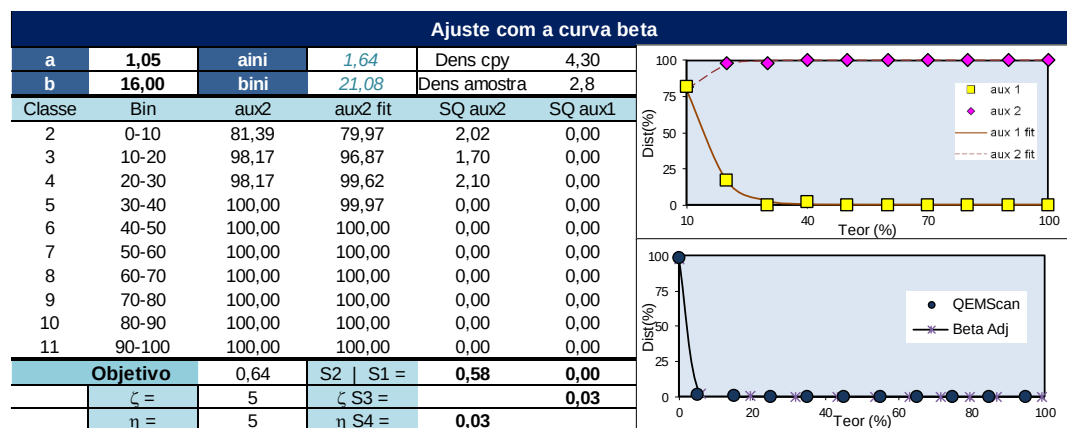
Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,1	teor metálico (%) =	0,06	teor metálico (%) =	0,0
densidade outros minerais =	2,8	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,8
teor volumétrico =	0,2	teor vol. Balanço fração =	0,1	teor volumétrico beta =	0,1
teor mineral % =	0,3	teor cpy balanço fração % =	0,2	teor mineral (%) =	0,1

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.15 - Cal 03- Rejeito Scavenger - Fração -74+44 μ m

Ensaio	Cal 03	Rej Scavenger	Fração -74 +44µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f_m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F_m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F_m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f_m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	98,0	0,0	-	-	-	-	97,9	0,00
2	0-10	1,6	5,0	81,39	81,39	79,97	79,97	1,7	3,9
3	10-20	0,3	15,0	16,79	98,17	96,87	16,90	0,4	13,6
4	20-30	0,0	25,0	0,00	98,17	99,62	2,75	0,1	23,5
5	30-40	0,0	35,0	1,83	100,00	99,97	0,34	0,0	33,3
6	40-50	0,0	45,0	0,00	100,00	100,00	0,03	0,0	43,0
7	50-60	0,0	55,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	52,7
8	60-70	0,0	65,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	62,3
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	71,8
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	81,2
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	99,0
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
	TOTAL	100,0	0,1	0,1			0,1	100,00	0,1
				0,0			0,0		
							Gama	-0.08	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,8	98,0	0,0	0,0	2,8	97,9	0,0
2	5,0	2,9	1,6	7,5	3,9	2,9	1,7	5,8
3	15,0	3,0	0,3	21,3	13,6	3,0	0,4	19,5
4	25,0	3,2	0,0	33,9	23,5	3,2	0,1	32,0
5	35,0	3,3	0,0	45,3	33,3	3,3	0,0	43,4
6	45,0	3,5	0,0	55,7	43,0	3,4	0,0	53,7
7	55,0	3,6	0,0	65,3	52,7	3,6	0,0	63,1
8	65,0	3,8	0,0	74,0	62,3	3,7	0,0	71,7
9	75,0	3,9	0,0	82,2	71,8	3,9	0,0	79,6
10	85,0	4,1	0,0	89,7	81,2	4,0	0,0	86,9
11	95,0	4,2	0,0	96,7	99,0	4,3	0,0	99,3
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,1	teor metálico (%) =	0,04	teor metálico (%) =	0,1
densidade outros minerais =	2,8	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,8
teor volumétrico =	0,1	teor vol. Balanço fração	0,1	teor volumétrico beta =	0,1
teor mineral % =	0,2	teor cpy balanço fração % =	0,1	teor mineral (%) =	0,2

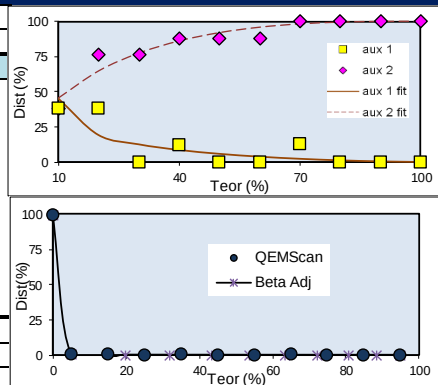
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.16 - Cal 03- Rejeito Scavenger - Fração -44+20 μ m

Ensaio	Cal 03	Rej Scavenger	Fração -44 +20 µm										
Dados de entrada e funções auxiliares													
bin		mass%		aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)				
1	0	98,8	0,0	-	-	-	-	99,4	0,00				
2	0-10	0,5	5,0	38,20	38,20	45,39	45,39	0,3	3,6				
3	10-20	0,5	15,0	37,90	76,09	64,71	19,32	0,1	14,6				
4	20-30	0,0	25,0	0,00	76,09	77,36	12,66	0,1	24,7				
5	30-40	0,1	35,0	11,58	87,68	86,03	8,66	0,1	34,7				
6	40-50	0,0	45,0	0,00	87,68	91,92	5,89	0,0	44,7				
7	50-60	0,0	55,0	0,00	87,68	95,79	3,87	0,0	54,6				
8	60-70	0,1	65,2	12,32	100,00	98,15	2,36	0,0	64,5				
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,00	99,40	1,26	0,0	74,4				
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	99,91	0,51	0,0	84,0				
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,09	0,0	92,7				
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00				
TOTAL		100,0	0,2	0,2			0,2	100,00	0,1				
				0,1			0,1						

Ajuste com a curva beta					
a	0,61	a ini	0,64	Dens cpy	4,30
b	2,71	b ini	2,60	Dens amostra	3,0
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	38,20	45,39	51,78	0,03
3	10-20	76,09	64,71	129,65	0,11
4	20-30	76,09	77,36	1,61	0,01
5	30-40	87,68	86,03	2,72	0,01
6	40-50	87,68	91,92	18,03	0,00
7	50-60	87,68	95,79	65,80	0,00
8	60-70	100,00	98,15	3,44	0,02
9	70-80	100,00	99,40	0,35	0,00
10	80-90	100,00	99,91	0,01	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
obj function		27,36	S2 S1 =	27,34	0,02
$\zeta =$		5	ζ S3 =		0,00
$\eta =$			η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	98,8	0,0	0,0	3,0	99,4	0,0
2	5,0	3,1	0,5	7,0	3,6	3,0	0,3	5,1
3	15,0	3,2	0,5	20,2	14,6	3,2	0,1	19,7
4	25,0	3,3	0,0	32,3	24,7	3,3	0,1	32,0
5	35,0	3,5	0,1	43,6	34,7	3,5	0,1	43,2
6	45,0	3,6	0,0	54,0	44,7	3,6	0,0	53,7
7	55,0	3,7	0,0	63,7	54,6	3,7	0,0	63,3
8	65,2	3,8	0,1	72,9	64,5	3,8	0,0	72,3
9	75,0	4,0	0,0	81,1	74,4	4,0	0,0	80,6
10	85,0	4,1	0,0	89,0	84,0	4,1	0,0	88,3
11	95,0	4,2	0,0	96,5	92,7	4,2	0,0	94,8
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0					
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,1	teor metálico (%) =	0,05	teor metálico (%) =	0,0
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	0,2	teor vol. Balanço fração	0,1	teor volumétrico beta =	0,1
teor mineral % =	0,3	teor cpv balanço fração % =	0,1	teor mineral (%) =	0,1

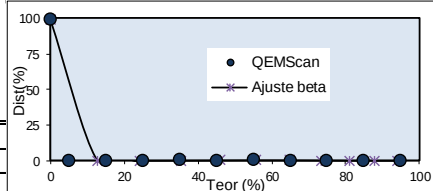
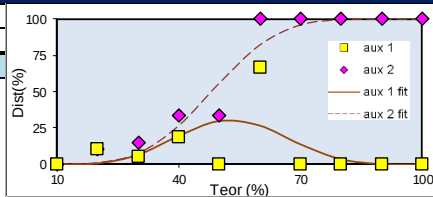
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.17 - Cal 03- Rejeito Scavenger - Fração -20 μ m

Ensaio	Cal 03	Rej Scavenger	Fração -20 µm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	99,1	0,0	-	-	-	-	99,1	0,00	
2	0-10	0,0	5,0	0,00	0,00	0,01	0,01	0,0	8,7	
3	10-20	0,1	15,0	9,98	9,98	0,78	0,77	0,0	17,3	
4	20-30	0,0	25,0	5,21	15,19	7,27	6,49	0,1	26,3	
5	30-40	0,2	35,0	18,64	33,83	26,48	19,21	0,2	35,6	
6	40-50	0,0	45,0	0,00	33,83	55,88	29,40	0,3	45,1	
7	50-60	0,6	55,0	66,17	100,00	82,26	26,38	0,2	54,7	
8	60-70	0,0	65,2	0,00	100,00	96,05	13,78	0,1	64,2	
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,00	99,68	3,63	0,0	73,5	
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,32	0,0	82,5	
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	91,2	
	100		100,0	-	-	-	-		100,00	
TOTAL		100,0	0,4	0,5			0,5	100,00	0,4	
				0,2			0,2			
								Gama	0,1	

Ajuste com a curva beta					
a	7,36	a ini	5,36	Dens cpy	4,30
b	7,92	b ini	6,37	Dens amostra	2,8
	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	0,00	0,01	0,00	0,00
3	10-20	9,98	0,78	84,56	0,01
4	20-30	15,19	7,27	62,66	0,00
5	30-40	33,83	26,48	53,98	0,00
6	40-50	33,83	55,88	486,24	0,07
7	50-60	100,00	82,26	314,62	0,15
8	60-70	100,00	96,05	15,63	0,02
9	70-80	100,00	99,68	0,10	0,00
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
Objetivo		101,81	S2 S1 =	101,78	0,02
$\zeta =$		1	ζ S3 =		0,01
$\eta =$		1	η S4 =	0,00	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,8	99,1	0,0	0,0	2,8	99,1	0,0
2	5,0	2,9	0,0	7,5	8,7	2,9	0,0	12,8
3	15,0	3,0	0,1	21,3	17,3	3,1	0,0	24,3
4	25,0	3,2	0,0	33,9	26,3	3,2	0,1	35,4
5	35,0	3,3	0,2	45,3	35,6	3,3	0,2	46,0
6	45,0	3,5	0,0	55,7	45,1	3,5	0,3	55,8
7	55,0	3,6	0,6	65,3	54,7	3,6	0,2	65,0
8	65,2	3,8	0,0	74,2	64,2	3,8	0,1	73,4
9	75,0	3,9	0,0	82,2	73,5	3,9	0,0	81,0
10	85,0	4,1	0,0	89,7	82,5	4,0	0,0	87,9
11	95,0	4,2	0,0	96,7	91,2	4,2	0,0	94,1
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,2	teor metálico (%) =	0,15	teor metálico (%) =	0,2
densidade outros minerais =	2,8	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,8
teor volumétrico =	0,4	teor vol. Balanço fração =	0,3	teor volumétrico beta =	0,4
teor mineral % =	0,4	teor cpy balanço fração % =	0,4	teor mineral (%) =	0,5

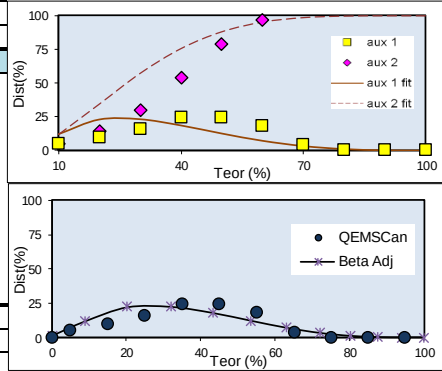
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.18 - Cal 03- Concentrado Cleaner - Fração +212 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Cleaner			Fração +212 µm							
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	0,0	0,0	-	-	-	-	1,1	0,00			
2	0-10	5,0	5,0	4,99	4,99	11,88	11,88	11,7	6,3			
3	10-20	9,5	15,0	9,47	14,46	34,49	22,61	22,4	15,2			
4	20-30	15,5	25,0	15,50	29,96	57,34	22,85	22,6	24,9			
5	30-40	24,0	35,0	23,99	53,95	75,69	18,35	18,1	34,7			
6	40-50	24,5	45,0	24,51	78,45	88,17	12,48	12,3	44,6			
7	50-60	17,9	55,0	17,94	96,40	95,34	7,17	7,1	54,5			
8	60-70	3,6	65,2	3,61	100,01	98,66	3,33	3,3	64,2			
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,01	99,78	1,12	1,1	73,9			
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,01	99,99	0,21	0,2	83,2			
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,01	100,00	0,01	0,0	91,8			
	100	0,0	100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	37,2	0,4			0,3	100,00	28,5			
				0,2			0,1					
							Gama	11000,0				

Ajuste com a curva beta					
a	1,91	aini	3,53	Dens cpy	4,30
b	4,71	bini	5,96	Dens amostra	3,4
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	4,99	11,88	47,42	45,63
3	10-20	14,46	34,49	401,14	166,20
4	20-30	29,96	57,34	749,38	50,33
5	30-40	53,95	75,69	472,70	34,04
6	40-50	78,45	88,17	94,39	147,92
7	50-60	96,40	95,34	1,13	117,85
8	60-70	100,01	98,66	1,82	0,10
9	70-80	100,01	99,78	0,05	1,23
10	80-90	100,01	99,99	0,00	0,04
11	90-100	100,01	100,00	0,00	0,00
obj function		275,33	S2 S1 =	176,80	56,33
$\zeta =$		10	ζ S3 =		37,35
$\eta =$		4	η S4 =	4,84	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,1	0,0
2	5,0	3,1	5,0	7,0	6,3	3,1	11,7	8,8
3	15,0	3,2	9,5	20,1	15,2	3,2	22,4	20,3
4	25,0	3,3	15,5	32,2	24,9	3,3	22,6	32,1
5	35,0	3,5	24,0	43,4	34,7	3,5	18,1	43,1
6	45,0	3,6	24,5	53,8	44,6	3,6	12,3	53,4
7	55,0	3,7	17,9	63,5	54,5	3,7	7,1	63,0
8	65,2	3,9	3,6	72,7	64,2	3,8	3,3	71,9
9	75,0	4,0	0,0	81,0	73,9	4,0	1,1	80,1
10	85,0	4,1	0,0	89,0	83,2	4,1	0,2	87,6
11	95,0	4,2	0,0	96,4	91,8	4,2	0,0	94,1
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0	44,8641859			100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	15,5	teor metálico (%) =	11,49	teor metálico (%) =	12,2
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	37,2	teor vol. Balanço fração =	25,9	teor volumétrico beta =	28,5
teor mineral % =	44,9	teor cpy balanço fração % =	33,2	teor mineral (%) =	35,1

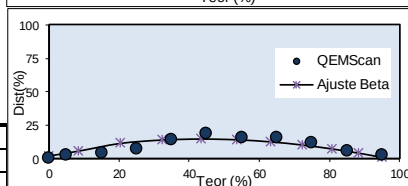
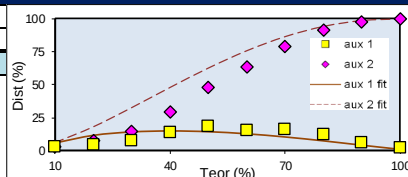
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.19 - Cal 03- Concentrado Cleaner - Fração -212+150 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Cleaner	Fração -212 +150µm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _{m mista,j}	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _{m mista} beta,j	Dist simples calculada beta- f _{m beta,j}	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	0,9	0,0	-	-	-	-	2,3	0,00	
2	0-10	2,6	5,0	2,65	2,65	6,18	6,18	6,0	6,2	
3	10-20	4,7	15,0	4,71	7,36	18,16	11,98	11,7	15,3	
4	20-30	7,4	25,0	7,47	14,82	32,71	14,55	14,2	25,1	
5	30-40	14,1	35,0	14,22	29,05	48,02	15,30	14,9	35,0	
6	40-50	18,5	45,0	18,66	47,71	62,74	14,73	14,4	44,9	
7	50-60	15,6	55,0	15,72	63,42	75,86	13,12	12,8	54,9	
8	60-70	15,8	65,0	15,92	79,34	86,57	10,71	10,5	64,8	
9	70-80	12,3	75,0	12,40	91,74	94,31	7,73	7,6	74,7	
10	80-90	5,8	85,0	5,81	97,55	98,75	4,44	4,3	84,4	
11	90-100	2,4	95,0	2,45	100,00	100,00	1,25	1,2	93,1	
				-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	51,2	0,5				0,4	100,00	41,7
				0,3						
							Gama	164,6		

Ajuste com a curva beta					
a	1,68	aini	2,48	Dens cpy	4,30
b	2,26	bini	2,33	Dens amostra	3,5
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	2,65	6,18	12,46	11,63
3	10-20	7,36	18,16	116,74	49,53
4	20-30	14,82	32,71	320,15	46,45
5	30-40	29,05	48,02	360,00	0,72
6	40-50	47,71	62,74	226,13	16,92
7	50-60	63,42	75,86	154,73	7,65
8	60-70	79,34	86,57	52,28	28,27
9	70-80	91,74	94,31	6,60	22,39
10	80-90	97,55	98,75	1,43	2,04
11	90-100	100,00	100,00	0,00	1,45
Objetivo		164,71	S2 S1 =	125,05	18,71
$\zeta =$		20	ζ S3 =		10,54
$\eta =$		5	η S4 =	10,41	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	0,9	0,0	0,0	3,0	2,3	0,0
2	5,0	3,1	2,6	6,9	6,2	3,1	6,0	8,5
3	15,0	3,2	4,7	20,0	15,3	3,2	11,7	20,3
4	25,0	3,4	7,4	32,1	25,1	3,4	14,2	32,2
5	35,0	3,5	14,1	43,3	35,0	3,5	14,9	43,3
6	45,0	3,6	18,5	53,7	44,9	3,6	14,4	53,6
7	55,0	3,7	15,6	63,4	54,9	3,7	12,8	63,3
8	65,0	3,9	15,8	72,5	64,8	3,9	10,5	72,3
9	75,0	4,0	12,3	81,0	74,7	4,0	7,6	80,7
10	85,0	4,1	5,8	88,9	84,4	4,1	4,3	88,4
11	95,0	4,2	2,4	96,4	93,1	4,2	1,2	95,0
	0,0	3,0		0,0	100,0	4,3	0,0	100,0
100,0								
100,0								

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 20,2	teor metálico (%) = 16,50	teor metálico (%) = 16,8
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 51,2	teor vol. Balanço fração = 39,2	teor volumétrico beta = 41,7
teor mineral % = 58,2	teor cpy balanço fração % = 47,7	teor mineral (%) = 48,4

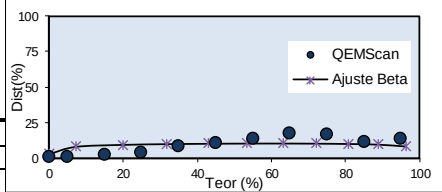
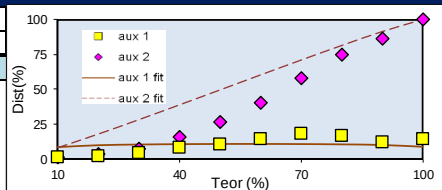
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.20 - Cal 03- Concentrado Cleaner - Fração -150+74 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Cleaner	Fração -150 +74µm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista	Dist simples calculada beta- f _m mista	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)		
1	0	0,9	0,0	-	-	-	-	-	3,0	0,00		
2	0-10	1,2	5,0	1,16	1,16	8,34	8,34	8,1	5,3			
3	10-20	2,1	15,0	2,14	3,30	18,10	9,76	9,5	15,1			
4	20-30	3,9	25,0	3,96	7,26	28,39	10,29	10,0	25,0			
5	30-40	8,2	35,0	8,30	15,56	38,95	10,57	10,3	35,0			
6	40-50	10,6	45,0	10,66	26,22	49,66	10,70	10,4	45,0			
7	50-60	13,7	55,0	13,84	40,06	60,38	10,73	10,4	55,0			
8	60-70	17,6	65,0	17,71	57,77	71,02	10,64	10,3	65,0			
9	70-80	16,5	75,0	16,63	74,40	81,43	10,41	10,1	75,0			
10	80-90	11,5	85,0	11,60	86,00	91,38	9,95	9,7	84,9			
11	90-100	13,9	95,0	14,00	100,00	100,00	8,62	8,4	94,7			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	63,3	0,6			0,5	100,00	48,7			
				0,5								
							Gama =	247,0				

Ajuste com a curva beta					
a	1,13	aini	2,45	Dens cpy	4,30
b	1,12	bini	1,39	Dens amostra	3,6
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	1,16	8,34	51,48	48,13
3	10-20	3,30	18,10	219,08	54,09
4	20-30	7,26	28,39	446,34	36,65
5	30-40	15,56	38,95	547,36	4,11
6	40-50	26,22	49,66	549,33	0,03
7	50-60	40,06	60,38	413,08	10,98
8	60-70	57,77	71,02	175,55	52,41
9	70-80	74,40	81,43	49,38	40,82
10	80-90	86,00	91,38	28,91	3,41
11	90-100	100,00	100,00	0,00	30,40
Objetivo		349,54	S2 S1 =	248,05	28,10
$\zeta =$		7	ζ S3 =		51,04
$\eta =$		5	η S4 =	22,35	

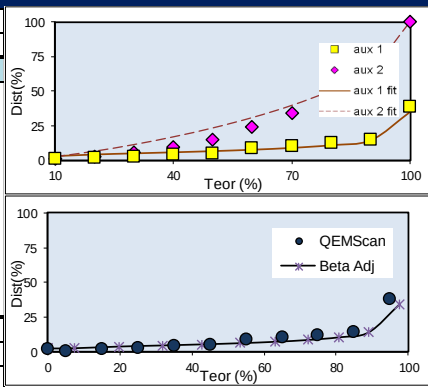


Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta _j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,1	0,9	0,0	0,0	3,1	3,0	0,0
2	5,0	3,1	1,2	6,9	5,3	3,1	8,1	7,3
3	15,0	3,3	2,1	19,8	15,1	3,3	9,5	19,9
4	25,0	3,4	3,9	31,9	25,0	3,4	10,0	31,9
5	35,0	3,5	8,2	43,0	35,0	3,5	10,3	43,0
6	45,0	3,6	10,6	53,4	45,0	3,6	10,4	53,4
7	55,0	3,7	13,7	63,2	55,0	3,7	10,4	63,2
8	65,0	3,9	17,6	72,3	65,0	3,9	10,3	72,3
9	75,0	4,0	16,5	80,8	75,0	4,0	10,1	80,8
10	85,0	4,1	11,5	88,8	84,9	4,1	9,7	88,8
11	95,0	4,2	13,9	96,4	94,7	4,2	8,4	96,2
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0	100,0				
Antes do ajuste beta, dados de liberação				relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta		
teor metálico (%) = 23,9				teor metálico (%) = 17,90		teor metálico (%) = 18,8		
densidade outros minerais = 3,1				val.metal / val.mineral = 0,35		densidade outros minerais = 3,1		
teor volumétrico = 63,3				teor vol. Balanço fração = 43,3		teor volumétrico beta = 48,7		
teor mineral % = 69,2				teor cpy balanço fração % = 51,7		teor mineral (%) = 54,4		

A-V.3.21 - Cal 03- Concentrado Cleaner - Fração -74+44 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Cleaner		Fração -74 +44µm									
Dados de entrada e funções auxiliares													
bin		mass%		aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)				
1	0	1,8	0,0	-	-	-	-	2,5	0,00				
2	0-10	0,8	5,0	0,78	0,78	2,77	2,77	2,7	5,6				
3	10-20	1,7	15,0	1,76	2,54	6,75	3,98	3,9	15,2				
4	20-30	3,0	25,0	3,06	5,59	11,54	4,79	4,7	25,1				
5	30-40	4,1	35,0	4,16	9,75	17,12	5,57	5,4	35,1				
6	40-50	5,0	45,0	5,11	14,86	23,54	6,43	6,3	45,1				
7	50-60	9,0	55,0	9,18	24,04	30,99	7,45	7,3	55,1				
8	60-70	10,1	65,0	10,31	34,35	39,77	8,78	8,6	65,1				
9	70-80	12,1	75,0	12,34	46,69	50,52	10,75	10,5	75,2				
10	80-90	14,4	85,0	14,68	61,37	64,90	14,38	14,0	85,3				
11	90-100	37,9	95,0	38,63	100,00	100,00	35,10	34,2	96,7				
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00				
TOTAL		100,0	73,6	0,8			0,7	100,00	69,1				
				0,6			0,6						
							Gama	37,61					

Ajuste com a curva beta					
a	1,24	aini	2,03	Dens cpy	4,30
b	0,51	bini	0,68	Dens amostra	3,9
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	0,78	2,77	3,98	3,76
3	10-20	2,54	6,75	17,78	4,64
4	20-30	5,59	11,54	35,42	2,79
5	30-40	9,75	17,12	54,28	1,83
6	40-50	14,86	23,54	75,37	1,55
7	50-60	24,04	30,99	48,27	3,08
8	60-70	34,35	39,77	29,34	2,45
9	70-80	46,69	50,52	14,67	2,66
10	80-90	61,37	64,90	12,46	0,16
11	90-100	100,00	100,00	0,00	13,74
Objetivo		45,03	S2 S1 =	29,16	3,66
ζ =		5	ζ S3 =		8,85
η =		7	η S4 =	3,36	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,1	1,8	0,0	0,0	3,1	2,5	0,0
2	5,0	3,2	0,8	6,8	5,6	3,2	2,7	7,6
3	15,0	3,3	1,7	19,6	15,2	3,3	3,9	19,9
4	25,0	3,4	3,0	31,6	25,1	3,4	4,7	31,7
5	35,0	3,5	4,1	42,7	35,1	3,5	5,4	42,8
6	45,0	3,6	5,0	53,1	45,1	3,6	6,3	53,2
7	55,0	3,8	9,0	62,9	55,1	3,8	7,3	63,0
8	65,0	3,9	10,1	72,0	65,1	3,9	8,6	72,1
9	75,0	4,0	12,1	80,6	75,2	4,0	10,5	80,8
10	85,0	4,1	14,4	88,7	85,3	4,1	14,0	88,9
11	95,0	4,2	37,9	96,3	96,7	4,3	34,2	97,6
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 26,9	teor metálico (%) = 24,85	teor metálico (%) = 25,3
densidade outros minerais = 3,1	val. metal / val. mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,1
teor volumétrico = 73,6	teor vol. Balanço fração = 64,8	teor volumétrico beta = 69,1
teor mineral % = 77,8	teor cpy balanço fração % = 71,8	teor mineral (%) = 73,2

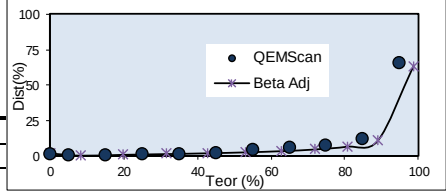
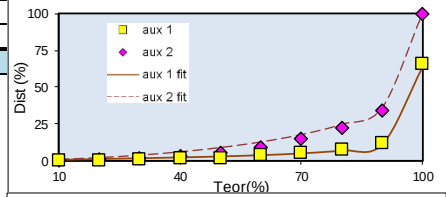
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.22 - Cal 03- Concentrado Cleaner - Fração -44+20 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Cleaner	Fração -44 +20 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMSCAN (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f_m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F_m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F_m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f_m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	1,0	0,0	-	-	-	-	2,2	0,00
2	0-10	0,2	5,0	0,24	0,24	0,58	0,58	0,6	6,1
3	10-20	0,4	15,0	0,41	0,65	1,76	1,18	1,2	15,4
4	20-30	1,1	25,0	1,06	1,71	3,46	1,70	1,7	25,3
5	30-40	1,5	35,0	1,56	3,27	5,73	2,27	2,2	35,2
6	40-50	1,9	45,0	1,96	5,23	8,67	2,94	2,9	45,2
7	50-60	4,1	55,0	4,09	9,32	12,48	3,80	3,7	55,2
8	60-70	5,6	65,2	5,64	14,96	17,50	5,03	4,9	65,2
9	70-80	7,3	75,0	7,40	22,37	24,52	7,02	6,9	75,3
10	80-90	11,6	85,0	11,76	34,12	35,73	11,21	11,0	85,5
11	90-100	65,2	95,0	65,88	100,00	100,00	64,27	62,9	98,1
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	85,0	0,9			0,9	100,00	84,2
				0,8			0,8		
							Gama	127,43	

Ajuste com a curva beta					
a	1,53	a ini	2,93	Dens cpy	4,30
b	0,25	b ini	0,48	Dens amostra	4,1
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	0,24	0,58	0,11	0,11
3	10-20	0,65	1,76	1,23	0,56
4	20-30	1,71	3,46	3,07	0,38
5	30-40	3,27	5,73	6,06	0,46
6	40-50	5,23	8,67	11,82	0,87
7	50-60	9,32	12,48	9,93	0,11
8	60-70	14,96	17,50	6,46	0,44
9	70-80	22,37	24,52	4,65	0,22
10	80-90	34,12	35,73	2,59	0,46
11	90-100	100,00	100,00	0,00	5,65
obj funtor		9,36	S2 S1 =	4,59	0,93
$\zeta =$		10	ζ S3 =		0,87
$\eta =$		2	η S4 =	2,97	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMSCAN (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,1	1,0	0,0	0,0	3,1	2,2	0,0
2	5,0	3,2	0,2	6,7	6,1	3,2	0,6	8,2
3	15,0	3,3	0,4	19,5	15,4	3,3	1,2	19,9
4	25,0	3,4	1,1	31,4	25,3	3,4	1,7	31,7
5	35,0	3,5	1,5	42,5	35,2	3,5	2,2	42,7
6	45,0	3,7	1,9	52,9	45,2	3,7	2,9	53,1
7	55,0	3,8	4,1	62,6	55,2	3,8	3,7	62,8
8	65,2	3,9	5,6	72,0	65,2	3,9	4,9	72,0
9	75,0	4,0	7,3	80,4	75,3	4,0	6,9	80,7
10	85,0	4,1	11,6	88,6	85,5	4,1	11,0	89,0
11	95,0	4,2	65,2	96,3	98,1	4,3	62,9	98,6
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	30,3	teor metálico (%) =	29,80	teor metálico (%) =	29,9
densidade outros minerais =	3,1	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,1
teor volumétrico =	85,0	teor vol. Balanço fração	81,9	teor volumétrico beta =	84,2
teor mineral % =	87,7	teor cpy balanço fração % =	86,1	teor mineral (%) =	86,4

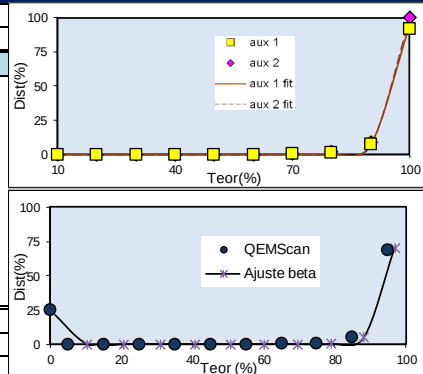
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.23 - Cal 03- Concentrado Cleaner - Fração -20 μ m

Ensaio	Cal 03	Conc Cleaner		Fração -20 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f_m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F_m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F_m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f_m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	24,7	0,0	-	-	-	-	25,0	0,00	
2	0-10	0,0	5,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	9,7	
3	10-20	0,0	15,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	19,4	
4	20-30	0,0	25,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	29,0	
5	30-40	0,0	35,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	38,7	
6	40-50	0,0	45,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	48,4	
7	50-60	0,0	55,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	58,1	
8	60-70	0,5	65,2	0,61	0,61	0,00	0,00	0,0	67,8	
9	70-80	0,8	75,0	1,00	1,61	0,22	0,22	0,2	77,6	
10	80-90	5,2	85,0	6,92	8,53	6,57	6,34	4,8	87,3	
11	90-100	68,9	95,0	91,47	100,00	100,00	93,43	70,1	96,6	
	100		100,0	-	-	-	-		100,00	
TOTAL		100,0	70,7	0,9			1,0	100,00	72,0	
				0,9			0,9			
							Gama	1,0		

Ajuste com a curva beta					
a	30,00	a ini	34,41	Dens cpy	4,30
b	1,25	b ini	2,22	Dens amostra	4,2
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	0,00	0,00	0,00	
3	10-20	0,00	0,00	0,00	
4	20-30	0,00	0,00	0,00	
5	30-40	0,00	0,00	0,00	
6	40-50	0,00	0,00	0,00	
7	50-60	0,00	0,00	0,00	
8	60-70	0,61	0,00	0,36	0,21
9	70-80	1,61	0,22	1,92	0,35
10	80-90	8,53	6,57	3,84	0,20
11	90-100	100,00	100,00	0,00	1,55
Objetivo		3,53	S2 S1 =	0,61	0,23
$\zeta =$		1	$\zeta S3 =$		2,63
$\eta =$		1	$\eta S4 =$	0,06	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,9	24,7	0,0	0,0	3,9	25,0	0,0
2	5,0	4,0	0,0	5,4	9,7	4,0	0,0	10,5
3	15,0	4,0	0,0	16,1	19,4	4,0	0,0	20,8
4	25,0	4,0	0,0	26,7	29,0	4,0	0,0	30,9
5	35,0	4,1	0,0	37,0	38,7	4,1	0,0	40,8
6	45,0	4,1	0,0	47,2	48,4	4,1	0,0	50,6
7	55,0	4,1	0,0	57,1	58,1	4,1	0,0	60,2
8	65,2	4,2	0,5	67,2	67,8	4,2	0,0	69,7
9	75,0	4,2	0,8	76,6	77,6	4,2	0,2	79,0
10	85,0	4,2	5,2	86,1	87,3	4,3	4,8	88,2
11	95,0	4,3	68,9	95,4	96,6	4,3	70,1	96,9
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0	71,1			100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 24,6	teor metálico (%) = 25,57	teor metálico (%) = 25,0
densidade outros minerais = 3,9	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,9
teor volumétrico = 70,7	teor vol. Balanço fração = 72,2	teor volumétrico beta = 72,0
teor mineral % = 71,1	teor cpy balanço fração % = 73,9	teor mineral (%) = 72,3

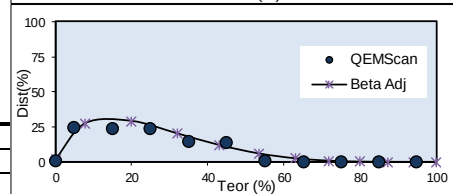
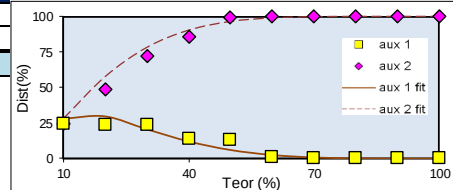
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)- Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.24 - Cal 03- Rejeito Cleaner - Fração +212 μ m

Ensaio	Cal 03	Rej Cleaner	Fração +212 µm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,beta,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	0,2	0,0	-	-	-	-	1,9	0,00	
2	0-10	24,5	5,0	24,53	24,53	27,96	27,96	27,4	5,6	
3	10-20	23,7	15,0	23,78	48,32	57,58	29,62	29,1	14,8	
4	20-30	23,7	25,0	23,73	72,04	78,22	20,63	20,2	24,6	
5	30-40	14,0	35,0	13,99	86,04	90,32	12,11	11,9	34,5	
6	40-50	13,3	45,0	13,28	99,32	96,41	6,09	6,0	44,4	
7	50-60	0,7	55,0	0,68	100,00	98,96	2,55	2,5	54,2	
8	60-70	0,0	65,2	0,00	100,00	99,80	0,83	0,8	63,9	
9	70-80	0,0	75,0	0,00	100,00	99,98	0,18	0,2	73,5	
10	80-90	0,0	85,0	0,00	100,00	100,00	0,02	0,0	82,8	
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,00	0,0	91,5	
	100	0,0	100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	21,9	0,2			0,2	100,00	19,6	
				0,1			0,1			
						Gama		756,4		

Ajuste com a curva beta					
a	1,46	aini	1,81	Dens cpy	4,30
b	5,86	bini	6,41	Dens amostra	3,2
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	24,53	27,96	11,77	8,78
3	10-20	48,32	57,58	85,87	28,49
4	20-30	72,04	78,22	38,08	11,75
5	30-40	86,04	90,32	18,37	4,33
6	40-50	99,32	96,41	8,44	52,94
7	50-60	100,00	98,96	1,07	3,33
8	60-70	100,00	99,80	0,04	0,67
9	70-80	100,00	99,98	0,00	0,03
10	80-90	100,00	100,00	0,00	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
obj function		31,54	S2 S1 =	16,36	11,03
$\zeta =$		5	ζ S3 =		1,45
$\eta =$		1	η S4 =	2,69	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	0,2	0,0	0,0	3,0	1,9	0,0
2	5,0	3,1	24,5	7,0	5,6	3,1	27,4	7,8
3	15,0	3,2	23,7	20,2	14,8	3,2	29,1	19,9
4	25,0	3,3	23,7	32,4	24,6	3,3	20,2	31,9
5	35,0	3,5	14,0	43,6	34,5	3,4	11,9	43,0
6	45,0	3,6	13,3	54,0	44,4	3,6	6,0	53,4
7	55,0	3,7	0,7	63,7	54,2	3,7	2,5	62,9
8	65,2	3,8	0,0	72,9	63,9	3,8	0,8	71,8
9	75,0	4,0	0,0	81,1	73,5	4,0	0,2	80,0
10	85,0	4,1	0,0	89,0	82,8	4,1	0,0	87,3
11	95,0	4,2	0,0	96,5	91,5	4,2	0,0	93,9
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	9,6	teor metálico (%) =	8,24	teor metálico (%) =	8,7
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	21,9	teor vol. Balanço fração =	17,9	teor volumétrico beta =	19,6
teor mineral % =	27,8	teor cpy balanço fração % =	23,8	teor mineral (%) =	25,0

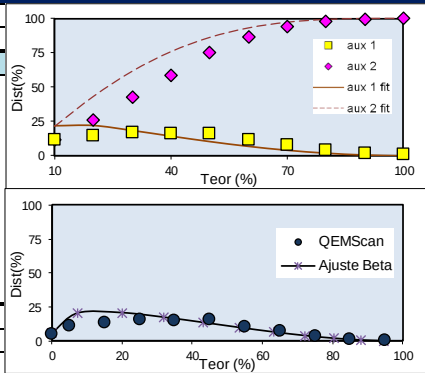
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.25 - Cal 03- Rejeito Cleaner - Fração -212+150 μ m

Ensaio	Cal 03	Rej Cleaner	Fração -212 +150µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _{m mista,j}	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _{m mista} beta,j	Dist simples calculada beta- f _{m beta,j}	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	4,8	0,0	-	-	-	-	5,9	0,00
2	0-10	11,2	5,0	11,79	11,79	21,56	21,56	20,3	5,3
3	10-20	13,5	15,0	14,22	26,01	43,34	21,78	20,5	14,9
4	20-30	16,0	25,0	16,84	42,85	61,60	18,26	17,2	24,8
5	30-40	15,2	35,0	15,92	58,77	75,83	14,22	13,4	34,8
6	40-50	15,5	45,0	16,28	75,05	86,16	10,34	9,7	44,7
7	50-60	10,7	55,0	11,24	86,29	93,07	6,91	6,5	54,6
8	60-70	7,3	65,0	7,67	93,96	97,19	4,11	3,9	64,5
9	70-80	3,5	75,0	3,64	97,60	99,22	2,03	1,9	74,3
10	80-90	1,5	85,0	1,53	99,12	99,91	0,69	0,7	83,8
11	90-100	0,8	95,0	0,88	100,00	100,00	0,09	0,1	92,4
	100			-	-	-	-	0,0	100,00
	TOTAL	100,0	34,1	0,4			0,3	100,00	25,5
				0,2			0,1		
								Gama	22,1

Ajuste com a curva beta					
a	1,19	aini	1,53	Dens cpy	4,30
b	3,20	bini	2,73	Dens amostra	3,3
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	11,79	21,56	95,59	82,40
3	10-20	26,01	43,34	300,42	48,44
4	20-30	42,85	61,60	351,80	1,35
5	30-40	58,77	75,83	290,89	3,13
6	40-50	75,05	86,16	123,44	33,28
7	50-60	86,29	93,07	46,06	17,55
8	60-70	93,96	97,19	10,43	11,76
9	70-80	97,60	99,22	2,63	2,40
10	80-90	99,12	99,91	0,62	0,64
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,57
Objetivo		171,60	S2 S1 =	122,19	20,15
$\zeta =$		10	ζ S3 =		23,59
$\eta =$		5	η S4 =	5,66	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe							
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j
1	0,0	3,0	4,8	0,0	0,0	3,0	5,9
2	5,0	3,1	11,2	7,0	5,3	3,1	20,3
3	15,0	3,2	13,5	20,1	14,9	3,2	20,5
4	25,0	3,3	16,0	32,2	24,8	3,3	17,2
5	35,0	3,5	15,2	43,4	34,8	3,5	13,4
6	45,0	3,6	15,5	53,8	44,7	3,6	9,7
7	55,0	3,7	10,7	63,5	54,6	3,7	6,5
8	65,0	3,9	7,3	72,6	64,5	3,8	3,9
9	75,0	4,0	3,5	81,0	74,3	4,0	1,9
10	85,0	4,1	1,5	89,0	83,8	4,1	0,7
11	95,0	4,2	0,8	96,4	92,4	4,2	0,1
	0,0	3,0		0,0	100,0	4,3	0,0
			100,0				100,0

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	14,0	teor metálico (%) =	10,25	teor metálico (%) =	10,8
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	34,1	teor vol. Balanço fração =	22,8	teor volumétrico beta =	25,5
teor mineral % =	40,6	teor cpy balanço fração % =	29,6	teor mineral (%) =	31,2

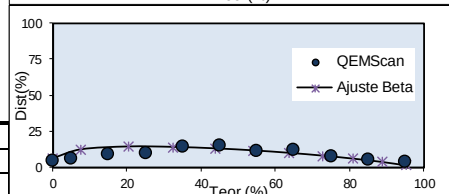
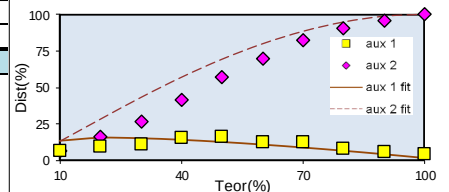
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)- Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.26 - Cal 03- Rejeito Cleaner - Fração -150+74 μ m

Ensaio	Cal 03	Rej Cleaner	Fração -150 +74µm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
bin		mass%	aux1		aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	4,4	0,0	-	-	-	-	6,4	0,00	
2	0-10	6,3	5,0	6,56	6,56	13,14	13,14	12,3	5,4	
3	10-20	8,9	15,0	9,31	15,88	28,30	15,17	14,2	15,0	
4	20-30	10,1	25,0	10,53	26,41	43,15	14,84	13,9	25,0	
5	30-40	14,4	35,0	15,07	41,48	56,94	13,79	12,9	34,9	
6	40-50	15,2	45,0	15,89	57,37	69,25	12,31	11,5	44,9	
7	50-60	11,7	55,0	12,29	69,66	79,79	10,54	9,9	54,8	
8	60-70	12,0	65,0	12,60	82,26	88,32	8,53	8,0	64,8	
9	70-80	7,7	75,0	8,04	90,30	94,65	6,33	5,9	74,7	
10	80-90	5,3	85,0	5,58	95,88	98,61	3,96	3,7	84,5	
11	90-100	3,9	95,0	4,12	100,00	100,00	1,39	1,3	93,4	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	44,4	0,5			0,4	100,00	35,3	
				0,3			0,2			

Ajuste com a curva beta					
a	1,19	aini	1,56	Dens cpy	4,30
b	1,97	bini	1,80	Dens amostra	3,4
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	6,56	13,14	43,18	36,27
3	10-20	15,88	28,30	154,35	28,05
4	20-30	26,41	43,15	280,24	14,71
5	30-40	41,48	56,94	239,02	2,23
6	40-50	57,37	69,25	141,15	13,40
7	50-60	69,66	79,79	102,51	3,55
8	60-70	82,26	88,32	36,72	16,41
9	70-80	90,30	94,65	18,98	3,07
10	80-90	95,88	98,61	7,46	2,65
11	90-100	100,00	100,00	0,00	6,96
Objetivo		182,87	S2 S1 =	102,36	12,73
$\zeta =$		3	ζ S3 =	56,35	
$\eta =$		3	η S4 =	11,43	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	4,4	0,0	0,0	3,0	6,4	0,0
2	5,0	3,0	6,3	7,1	5,4	3,0	12,3	7,6
3	15,0	3,2	8,9	20,3	15,0	3,2	14,2	20,3
4	25,0	3,3	10,1	32,5	25,0	3,3	13,9	32,5
5	35,0	3,4	14,4	43,8	34,9	3,4	12,9	43,7
6	45,0	3,6	15,2	54,2	44,9	3,6	11,5	54,1
7	55,0	3,7	11,7	63,9	54,8	3,7	9,9	63,7
8	65,0	3,8	12,0	72,9	64,8	3,8	8,0	72,7
9	75,0	4,0	7,7	81,3	74,7	4,0	5,9	81,0
10	85,0	4,1	5,3	89,1	84,5	4,1	3,7	88,7
11	95,0	4,2	3,9	96,5	93,4	4,2	1,3	95,3
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	17,7	teor metálico (%) =	12,9	teor metálico (%) =	14,4
densidade outros minerais =	3,0	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	44,4	teor vol. Balanço fração	29,1	teor volumétrico beta =	35,3
teor mineral % =	51,1	teor cpy balanço fração % =	37,3	teor mineral (%) =	41,6

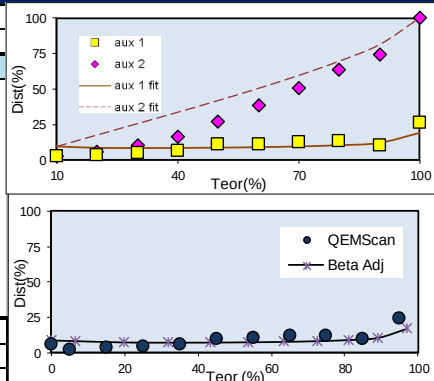
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.27 - Cal 03- Rejeito Cleaner - Fração -74+44 μ m

Ensaio		Cal 03		Rej Cleaner		Fração -74 +44µm							
Dados de entrada e funções auxiliares													
bin		mass%		aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m mista,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)				
1	0	6,1	0,0	-	-	-	-	8,9	0,00				
2	0-10	2,0	5,0	2,17	2,17	9,19	9,19	8,4	4,7				
3	10-20	3,3	15,0	3,56	5,72	17,33	8,14	7,4	15,0				
4	20-30	4,4	25,0	4,65	10,37	25,32	7,99	7,3	25,0				
5	30-40	5,7	35,0	6,08	16,45	33,38	8,06	7,3	35,0				
6	40-50	10,0	45,0	10,66	27,11	41,64	8,26	7,5	45,0				
7	50-60	10,3	55,0	10,97	38,08	50,25	8,61	7,8	55,0				
8	60-70	11,7	65,0	12,45	50,53	59,40	9,15	8,3	65,1				
9	70-80	12,3	75,0	13,05	63,58	69,42	10,02	9,1	75,1				
10	80-90	9,8	85,0	10,39	73,97	81,09	11,67	10,6	85,2				
11	90-100	24,4	95,0	26,03	100,00	100,00	18,91	17,2	95,9				
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00				
TOTAL		100,0	62,2	0,7			0,6	100,00	51,5				
				0,5			0,4						

Ajuste com a curva beta					
a	0,89	aini	1,66	Dens cpy	4,30
b	0,69	bini	0,85	Dens amostra	3,6
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	2,17	9,19	49,39	40,26
3	10-20	5,72	17,33	134,74	16,61
4	20-30	10,37	25,32	223,60	8,53
5	30-40	16,45	33,38	286,65	2,67
6	40-50	27,11	41,64	211,18	6,17
7	50-60	38,08	50,25	148,05	6,06
8	60-70	50,53	59,40	78,58	11,27
9	70-80	63,58	69,42	34,12	9,73
10	80-90	73,97	81,09	50,64	0,76
11	90-100	100,00	100,00	0,00	52,00
Objetivo		172,92	S2 S1 =	121,70	15,40
$\zeta =$		15	ζ S3 =		12,55
$\eta =$		3	η S4 =	23,27	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	6,1	0,0	0,0	3,0	8,9	0,0
2	5,0	3,1	2,0	6,9	4,7	3,1	8,4	6,6
3	15,0	3,2	3,3	20,0	15,0	3,2	7,4	19,9
4	25,0	3,4	4,4	32,0	25,0	3,4	7,3	32,0
5	35,0	3,5	5,7	43,2	35,0	3,5	7,3	43,2
6	45,0	3,6	10,0	53,6	45,0	3,6	7,5	53,6
7	55,0	3,7	10,3	63,3	55,0	3,7	7,8	63,4
8	65,0	3,9	11,7	72,4	65,1	3,9	8,3	72,5
9	75,0	4,0	12,3	80,9	75,1	4,0	9,1	81,0
10	85,0	4,1	9,8	88,9	85,2	4,1	10,6	89,0
11	95,0	4,2	24,4	96,4	95,9	4,2	17,2	97,1
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 23,3	teor metálico (%) = 19,12	teor metálico (%) = 19,4
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 62,2	teor vol. Balanço fração = 46,7	teor volumétrico beta = 51,5
teor mineral % = 67,2	teor cpy balanço fração % = 55,3	teor mineral (%) = 56,2

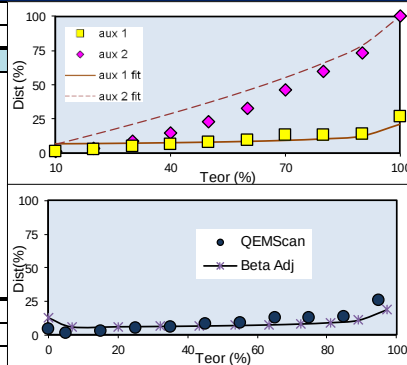
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.28 - Cal 03- Rejeito Cleaner - Fração -44+20 μ m

Ensaio	Cal 03	Rej Cleaner	Fração -44 +20 µm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	4,6	0,0	-	-	-	-	13,0	0,00	
2	0-10	1,2	5,0	1,25	1,25	6,92	6,92	6,0	5,0	
3	10-20	2,4	15,0	2,55	3,80	14,02	7,10	6,2	15,0	
4	20-30	4,7	25,0	4,97	8,77	21,40	7,37	6,4	25,0	
5	30-40	6,1	35,0	6,35	15,13	29,11	7,71	6,7	35,0	
6	40-50	7,8	45,0	8,22	23,34	37,25	8,14	7,1	45,0	
7	50-60	9,3	55,0	9,71	33,05	45,95	8,69	7,6	55,1	
8	60-70	12,8	65,2	13,43	46,48	55,39	9,45	8,2	65,1	
9	70-80	12,5	75,0	13,05	59,53	65,97	10,57	9,2	75,1	
10	80-90	13,2	85,0	13,88	73,41	78,56	12,60	11,0	85,2	
11	90-100	25,4	95,0	26,59	100,00	100,00	21,44	18,7	96,0	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	65,4	0,7			0,6	100,00	52,0	
				0,5			0,4			

Ajuste com a curva beta					
a	0,99	a ini	1,85	Dens cpy	4,30
b	0,67	b ini	0,85	Dens amostra	3,6
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	1,25	6,92	32,16	23,31
3	10-20	3,80	14,02	104,44	14,01
4	20-30	8,77	21,40	159,32	2,79
5	30-40	15,13	29,11	195,50	0,42
6	40-50	23,34	37,25	193,40	0,57
7	50-60	33,05	45,95	166,25	2,88
8	60-70	46,48	55,39	79,46	21,09
9	70-80	59,53	65,97	41,39	10,61
10	80-90	73,41	78,56	26,56	5,21
11	90-100	100,00	100,00	0,00	45,17
obj funtor		470,51	S2 S1 =	99,85	12,61
$\zeta =$		5	ζ S3 =		3,90
$\eta =$		5	η S4 =	354,15	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	4,6	0,0	0,0	3,0	13,0	0,0
2	5,0	3,1	1,2	6,9	5,0	3,1	6,0	6,9
3	15,0	3,2	2,4	20,0	15,0	3,2	6,2	20,0
4	25,0	3,4	4,7	32,1	25,0	3,4	6,4	32,1
5	35,0	3,5	6,1	43,3	35,0	3,5	6,7	43,3
6	45,0	3,6	7,8	53,7	45,0	3,6	7,1	53,7
7	55,0	3,7	9,3	63,4	55,1	3,7	7,6	63,4
8	65,2	3,9	12,8	72,6	65,1	3,9	8,2	72,5
9	75,0	4,0	12,5	80,9	75,1	4,0	9,2	81,0
10	85,0	4,1	13,2	88,9	85,2	4,1	11,0	89,1
11	95,0	4,2	25,4	96,4	96,0	4,2	18,7	97,1
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	24,4	teor metálico (%) =	19,25	teor metálico (%) =	19,6
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	65,4	teor vol. Balanço fração =	47,0	teor volumétrico beta =	52,0
teor mineral % =	70,4	teor cpy balanço fração % =	55,6	teor mineral (%) =	56,5

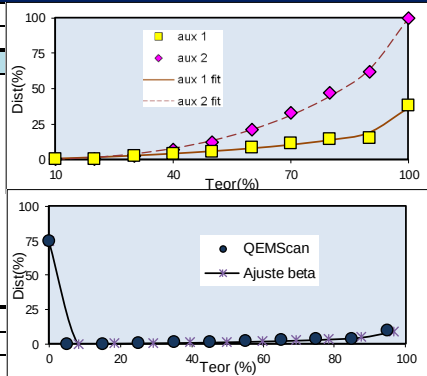
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.29 - Cal 03- Rejeito Cleaner - Fração -20 μ m

Ensaio	Cal 03	Rej Cleaner	Fração -20 µm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	74,7	0,0	-	-	-	-	74,9	0,00			
2	0-10	0,0	5,0	0,11	0,11	0,33	0,33	0,1	6,9			
3	10-20	0,1	15,0	0,42	0,53	1,59	1,26	0,3	15,7			
4	20-30	0,6	25,0	2,32	2,85	4,05	2,45	0,6	25,4			
5	30-40	1,1	35,0	4,30	7,15	7,93	3,89	1,0	35,3			
6	40-50	1,3	45,0	5,34	12,48	13,52	5,59	1,4	45,3			
7	50-60	2,2	55,0	8,75	21,23	21,16	7,64	1,9	55,2			
8	60-70	2,9	65,2	11,49	32,72	31,35	10,18	2,6	65,2			
9	70-80	3,6	75,0	14,10	46,82	44,91	13,56	3,4	75,2			
10	80-90	3,7	85,0	14,77	61,59	63,69	18,78	4,7	85,3			
11	90-100	9,7	95,0	38,41	100,00	100,00	36,31	9,1	96,1			
	100		100,0	-	-	-	-		100,00			
TOTAL		100,0	19,3	0,8			0,8	100,00	19,3			
				0,6			0,6					
							Gama	0,2				

Ajuste com a curva beta					
a	2,23	a ini	2,61	Dens cpy	4,30
b	0,68	b ini	0,80	Dens amostra	3,7
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	0,11	0,33	0,05	0,00
3	10-20	0,53	1,59	1,13	0,04
4	20-30	2,85	4,05	1,43	0,00
5	30-40	7,15	7,93	0,62	0,01
6	40-50	12,48	13,52	1,08	0,00
7	50-60	21,23	21,16	0,00	0,09
8	60-70	32,72	31,35	1,89	0,12
9	70-80	46,82	44,91	3,66	0,02
10	80-90	61,59	63,69	4,40	0,97
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,34
Objetivo		1,64	S2 S1 =	1,43	0,16
$\zeta =$		1	ζ S3 =		0,04
$\eta =$		1	η S4 =	0,02	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,6	74,7	0,0	0,0	3,6	74,9	0,0
2	5,0	3,6	0,0	5,9	6,9	3,6	0,1	8,2
3	15,0	3,7	0,1	17,5	15,7	3,7	0,3	18,3
4	25,0	3,8	0,6	28,6	25,4	3,8	0,6	29,1
5	35,0	3,8	1,1	39,3	35,3	3,8	1,0	39,6
6	45,0	3,9	1,3	49,6	45,3	3,9	1,4	49,9
7	55,0	4,0	2,2	59,5	55,2	4,0	1,9	59,7
8	65,2	4,0	2,9	69,2	65,2	4,0	2,6	69,3
9	75,0	4,1	3,6	78,3	75,2	4,1	3,4	78,5
10	85,0	4,2	3,7	87,2	85,3	4,2	4,7	87,5
11	95,0	4,3	9,7	95,8	96,1	4,3	9,1	96,7
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 6,9	teor metálico (%) = 6,82	teor metálico (%) = 6,9
densidade outros minerais = 3,6	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,6
teor volumétrico = 19,3	teor vol. Balanço fração = 17,0	teor volumétrico beta = 19,3
teor mineral % = 20,0	teor cpy balanço fração % = 19,7	teor mineral (%) = 19,9

Nilce Alves dos Santos

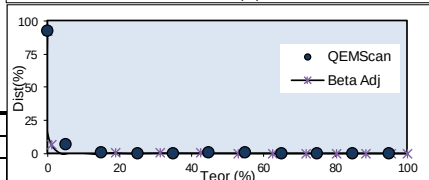
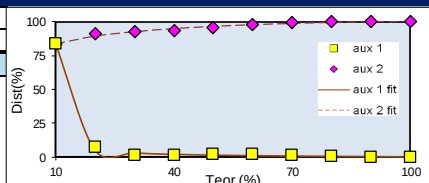
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)- Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.30 - Cal 03- Rejeito Rougher 1 - Fração +212 μ m

Dados de entrada calculados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 03	Rej Rg 1	Fração +212 μm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa Estimada (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	92,3	0,0	-	-	-	-	92,3	0,00	
2	0-10	6,4	5,0	83,56	83,56	84,09	84,09	6,5	0,9	
3	10-20	0,6	15,0	7,64	91,20	89,58	5,49	0,4	14,4	
4	20-30	0,1	25,0	1,41	92,61	92,76	3,18	0,2	24,6	
5	30-40	0,1	35,0	1,10	93,70	94,93	2,17	0,2	34,7	
6	40-50	0,2	45,0	1,97	95,68	96,52	1,59	0,1	44,8	
7	50-60	0,2	55,0	2,30	97,98	97,72	1,20	0,1	54,8	
8	60-70	0,1	65,2	1,50	99,48	98,63	0,91	0,1	64,8	
9	70-80	0,0	75,0	0,47	99,95	99,30	0,67	0,1	74,7	
10	80-90	0,0	85,0	0,05	100,00	99,77	0,47	0,0	84,6	
11	90-100	0,0	95,0	0,00	100,00	100,00	0,23	0,0	93,9	
	100	0,0	100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		100,0	0,7	0,1			0,1	100,00	0,5	
				0,0			0,0			
							Gama	0,0		

Ajuste com a curva beta					
a	0,10	aini	0,39	Dens cpy	4,30
b	1,50	bini	3,66	Dens amostra	3,1
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	83,56	84,09	0,29	0,00
3	10-20	91,20	89,58	2,60	0,03
4	20-30	92,61	92,76	0,02	0,02
5	30-40	93,70	94,93	1,52	0,01
6	40-50	95,68	96,52	0,72	0,00
7	50-60	97,98	97,72	0,07	0,01
8	60-70	99,48	98,63	0,72	0,00
9	70-80	99,95	99,30	0,42	0,00
10	80-90	100,00	99,77	0,05	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
obj function		0,65	S2 S1 =	0,64	0,01
$\zeta =$		1	ζ S3 =		0,00
$\eta =$			η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,1	92,3	0,0	0,0	3,1	92,3	0,0
2	5,0	3,2	6,4	6,8	0,9	3,1	6,5	1,2
3	15,0	3,3	0,6	19,7	14,4	3,3	0,4	19,0
4	25,0	3,4	0,1	31,7	24,6	3,4	0,2	31,2
5	35,0	3,5	0,1	42,8	34,7	3,5	0,2	42,5
6	45,0	3,6	0,2	53,2	44,8	3,6	0,1	53,0
7	55,0	3,8	0,2	62,9	54,8	3,8	0,1	62,7
8	65,2	3,9	0,1	72,3	64,8	3,9	0,1	71,9
9	75,0	4,0	0,0	80,7	74,7	4,0	0,1	80,4
10	85,0	4,1	0,0	88,7	84,6	4,1	0,0	88,4
11	95,0	4,2	0,0	96,4	93,9	4,2	0,0	95,6
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,3	teor metálico (%) =	0,24	teor metálico (%) =	0,2
densidade outros minerais =	3,1	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,1
teor volumétrico =	0,7	teor vol. Balanço fração	0,5	teor volumétrico beta =	0,5
teor mineral % =	0,9	teor cpy balanço fração % =	0,7	teor mineral (%) =	0,6

Nilce Alves dos Santos

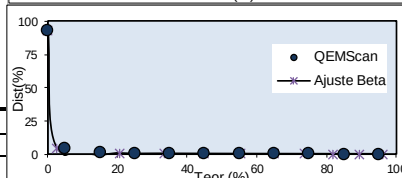
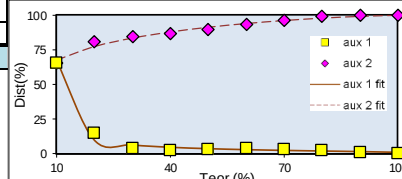
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.31 - Cal 03- Rejeito Rougher 1 - Fração -212+150 μ m

Dados de entrada calculados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 03	Rej Rougher 1	Fração -212 +150µm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa ESTIMADA (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	93,0	0,0	-	-	-	-	93,3	0,00	
2	0-10	4,6	5,0	65,59	65,59	67,62	67,62	4,6	1,7	
3	10-20	1,0	15,0	14,79	80,39	77,39	9,77	0,7	14,5	
4	20-30	0,3	25,0	3,87	84,26	83,50	6,11	0,4	24,7	
5	30-40	0,2	35,0	2,46	86,73	87,93	4,43	0,3	34,8	
6	40-50	0,2	45,0	2,96	89,68	91,34	3,41	0,2	44,8	
7	50-60	0,2	55,0	3,39	93,08	94,05	2,71	0,2	54,8	
8	60-70	0,2	65,0	3,23	96,31	96,21	2,17	0,1	64,8	
9	70-80	0,2	75,0	2,38	98,69	97,93	1,72	0,1	74,8	
10	80-90	0,1	85,0	1,12	99,81	99,23	1,30	0,1	84,7	
11	90-100	0,0	95,0	0,12	99,93	100,00	0,77	0,1	94,2	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
	TOTAL	100,0	1,1	0,2			0,1	100,00	0,9	
				0,1			0,1			
							Gama	0,3		

Ajuste com a curva beta						
a	0,20	aini	0,37	Dens cpy	4,30	
b	1,35	bini	1,99	Dens amostra	2,8	
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	65,59	67,62	4,10	0,00	
3	10-20	80,39	77,39	8,98	0,14	
4	20-30	84,26	83,50	0,57	0,02	
5	30-40	86,73	87,93	1,45	0,02	
6	40-50	89,68	91,34	2,75	0,00	
7	50-60	93,08	94,05	0,94	0,00	
8	60-70	96,31	96,21	0,01	0,01	
9	70-80	98,69	97,93	0,57	0,00	
10	80-90	99,81	99,23	0,34	0,00	
11	90-100	99,93	100,00	0,00	0,00	
Objetivo		2,69	S2 S1 =	1,97	0,02	
ζ =		5	ζ S3 =		0,65	
η =		1	η S4 =	0,05		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,8	93,0	0,0	0,0	2,8	93,3	0,0
2	5,0	2,9	4,6	7,5	1,7	2,8	4,6	2,5
3	15,0	3,0	1,0	21,3	14,5	3,0	0,7	20,7
4	25,0	3,2	0,3	33,8	24,7	3,2	0,4	33,5
5	35,0	3,3	0,2	45,2	34,8	3,3	0,3	45,0
6	45,0	3,5	0,2	55,7	44,8	3,5	0,2	55,5
7	55,0	3,6	0,2	65,2	54,8	3,6	0,2	65,1
8	65,0	3,8	0,2	74,0	64,8	3,8	0,1	73,9
9	75,0	3,9	0,2	82,2	74,8	3,9	0,1	82,0
10	85,0	4,1	0,1	89,7	84,7	4,1	0,1	89,5
11	95,0	4,2	0,0	96,7	94,2	4,2	0,1	96,1
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta		
teor metálico (%) =	0,5	teor metálico (%) =	0,28	teor metálico (%) =	0,4
densidade outros minerais =	2,8	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	2,8
teor volumétrico =	1,1	teor vol. Balanço fração =	0,5	teor volumétrico beta =	0,9
teor mineral % =	1,4	teor cpy balanço fração % =	0,8	teor mineral (%) =	1,1

Nilce Alves dos Santos

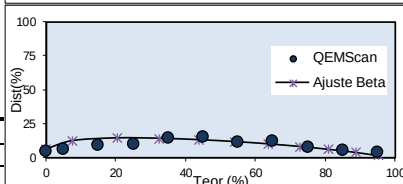
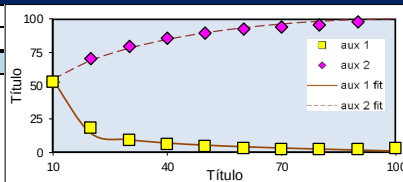
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.32 - Cal 03- Rejeito Rougher 1 - Fração -150+74 μ m

Dados de entrada calculados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 03	Rejeito Rougher 1		Fração -150 +74µm									
Dados de entrada e funções auxiliares													
bin		mass%		aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa Estimada (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m	Dist auxiliar acumulada calculada - beta- F _m	Dist auxiliar simples calculada - beta- f _m mista	Dist simples calculada - beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)				
1	0	94,1	0,0	-	-	-	-	95,0	0,00				
2	0-10	3,1	5,0	52,17	52,17	54,57	54,57	2,7	2,6				
3	10-20	1,1	15,0	18,33	70,50	68,68	14,11	0,7	14,6				
4	20-30	0,5	25,0	9,20	79,70	77,84	9,16	0,5	24,7				
5	30-40	0,3	35,0	5,85	85,54	84,48	6,64	0,3	34,8				
6	40-50	0,2	45,0	3,94	89,48	89,48	5,00	0,3	44,8				
7	50-60	0,2	55,0	2,65	92,13	93,29	3,80	0,2	54,8				
8	60-70	0,1	65,0	1,88	94,01	96,14	2,85	0,1	64,7				
9	70-80	0,1	75,0	1,67	95,68	98,17	2,04	0,1	74,7				
10	80-90	0,1	85,0	2,04	97,72	99,47	1,30	0,1	84,5				
11	90-100	0,2	95,0	2,70	100,42	100,00	0,53	0,0	93,6				
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00				
TOTAL		100,0	1,2	0,2			0,2	100,00	0,9				
				0,1			0,1						
							Gama =	0.9					

Ajuste com a curva beta					
a	0,36	aini	0,40	Dens cpy	4,30
b	1,72	bini	1,64	Dens amostra	3,1
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	52,17	54,57	5,77	0,10
3	10-20	70,50	68,68	3,32	0,13
4	20-30	79,70	77,84	3,44	0,01
5	30-40	85,54	84,48	1,13	0,00
6	40-50	89,48	89,48	0,00	0,00
7	50-60	92,13	93,29	1,35	0,00
8	60-70	94,01	96,14	4,53	0,00
9	70-80	95,68	98,17	6,22	0,00
10	80-90	97,72	99,47	3,06	0,00
11	90-100	100,42	100,00	0,18	0,02
Objetivo		2,93	S2 S1 =	2,90	0,03
$\zeta =$			ζ S3 =		0,00
$\eta =$			η S4 =		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,1	94,1	0,0	0,0	3,1	95,0	0,0
2	5,0	3,2	3,1	6,8	2,6	3,1	2,74	3,6
3	15,0	3,3	1,1	19,7	14,6	3,3	0,71	19,2
4	25,0	3,4	0,5	31,7	24,7	3,4	0,46	31,3
5	35,0	3,5	0,3	42,8	34,8	3,5	0,33	42,6
6	45,0	3,6	0,2	53,2	44,8	3,6	0,25	53,0
7	55,0	3,8	0,2	63,0	54,8	3,8	0,19	62,8
8	65,0	3,9	0,1	72,1	64,7	3,9	0,14	71,9
9	75,0	4,0	0,1	80,7	74,7	4,0	0,10	80,4
10	85,0	4,1	0,1	88,7	84,5	4,1	0,07	88,4
11	95,0	4,2	0,2	96,4	93,6	4,2	0,03	95,3
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
100,0				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	0,5	teor metálico (%) =	0,38	teor metálico (%) =	0,4
densidade outros minerais =	3,1	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,1
teor volumétrico =	1,2	teor vol. Balanço fração =	0,8	teor volumétrico beta =	0,9
teor mineral % =	1,4	teor cpy balanço fração % =	1,1	teor mineral (%) =	1,0

Nilce Alves dos Santos

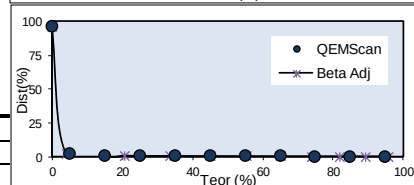
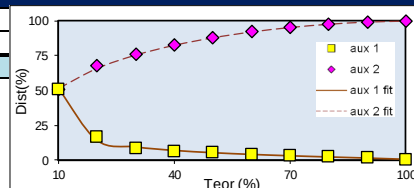
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.33 - Cal 03- Rejeito Rougher 1 - Fração -74+44 μ m

Dados de entrada calculados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 03	Rej Rougher 1	Fração -74 +44µm									
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa ESTIMADA (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	95,9	0,0	-	-	-	-	96,1	0,00			
2	0-10	2,1	5,0	50,67	50,67	51,69	51,69	2,0	2,7			
3	10-20	0,7	15,0	16,74	67,40	66,07	14,39	0,6	14,6			
4	20-30	0,3	25,0	8,55	75,95	75,61	9,54	0,4	24,7			
5	30-40	0,3	35,0	6,36	82,31	82,65	7,03	0,3	34,8			
6	40-50	0,2	45,0	5,26	87,57	88,04	5,39	0,2	44,8			
7	50-60	0,2	55,0	4,31	91,88	92,22	4,18	0,2	54,8			
8	60-70	0,1	65,0	3,39	95,27	95,41	3,20	0,1	64,8			
9	70-80	0,1	75,0	2,46	97,73	97,76	2,35	0,1	74,7			
10	80-90	0,1	85,0	1,52	99,25	99,32	1,56	0,1	84,6			
11	90-100	0,0	95,0	0,54	99,79	100,00	0,68	0,0	93,7			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	0,8	0,2			0,2	100,00	0,7			
							0,1					
							Gama	0,16				

Ajuste com a curva beta					
a	0,38	aini	0,50	Dens cpy	4,30
b	1,65	bini	1,99	Dens amostra	2,8
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	50,67	51,69	1,04	0,00
3	10-20	67,40	66,07	1,77	0,01
4	20-30	75,95	75,61	0,12	0,00
5	30-40	82,31	82,65	0,11	0,00
6	40-50	87,57	88,04	0,22	0,00
7	50-60	91,88	92,22	0,11	0,00
8	60-70	95,27	95,41	0,02	0,00
9	70-80	97,73	97,76	0,00	0,00
10	80-90	99,25	99,32	0,00	0,00
11	90-100	99,79	100,00	0,05	0,00
Objetivo		0,50	S2 S1 =	0,34	0,00
$\zeta =$		5	ζ S3 =		0,14
$\eta =$		1	η S4 =	0,02	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,8	95,9	0,0	0,0	2,8	96,1	0,0
2	5,0	2,9	2,1	7,5	2,7	2,8	2,0	4,1
3	15,0	3,0	0,7	21,3	14,6	3,0	0,6	20,8
4	25,0	3,2	0,3	33,8	24,7	3,2	0,4	33,5
5	35,0	3,3	0,3	45,3	34,8	3,3	0,3	45,0
6	45,0	3,5	0,2	55,7	44,8	3,5	0,2	55,5
7	55,0	3,6	0,2	65,2	54,8	3,6	0,2	65,0
8	65,0	3,8	0,1	74,0	64,8	3,8	0,1	73,8
9	75,0	3,9	0,1	82,2	74,7	3,9	0,1	81,9
10	85,0	4,1	0,1	89,7	84,6	4,1	0,1	89,4
11	95,0	4,2	0,0	96,7	93,7	4,2	0,0	95,8
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 0,4	teor metálico (%) = 0,30	teor metálico (%) = 0,3
densidade outros minerais = 2,8	val. metal / val. mineral = 0,35	densidade outros minerais = 2,8
teor volumétrico = 0,8	teor vol. Balanço fração = 0,6	teor volumétrico beta = 0,7
teor mineral % = 1,0	teor cpy balanço fração % = 0,9	teor mineral (%) = 0,9

Nilce Alves dos Santos

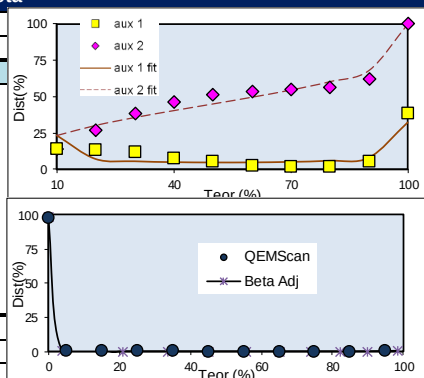
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.34 - Cal 03- Rejeito Rougher 1 - Fração -44+20 μ m

Dados de entrada calculados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 03	Rej Rg 1	Fração -44 +20 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa Estimada (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	97,8	0,0	-	-	-	-	98,5	0,00
2	0-10	0,3	5,0	14,01	14,01	23,24	23,24	0,3	2,6
3	10-20	0,3	15,0	12,93	26,94	30,19	6,95	0,1	14,7
4	20-30	0,3	25,0	11,57	38,51	35,57	5,38	0,1	24,9
5	30-40	0,2	35,0	7,70	46,21	40,33	4,77	0,1	34,9
6	40-50	0,1	45,0	4,98	51,19	44,89	4,55	0,1	45,0
7	50-60	0,1	55,0	2,34	53,54	49,49	4,61	0,1	55,0
8	60-70	0,0	65,2	1,35	54,89	54,44	4,95	0,1	65,1
9	70-80	0,0	75,0	1,61	56,50	60,19	5,75	0,1	75,2
10	80-90	0,1	85,0	5,38	61,88	67,92	7,73	0,1	85,3
11	90-100	0,8	95,0	38,12	100,00	100,00	32,08	0,5	97,7
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
TOTAL		100,0	1,2	0,5			0,5	100,00	0,8
				0,4			0,5		
							Gama	0,70	

Ajuste com a curva beta					
a	0,35	a ini	0,45	Dens cpy	4,30
b	0,29	b ini	0,37	Dens amostra	2,8
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	14,01	23,24	85,19	0,00
3	10-20	26,94	30,19	10,55	0,03
4	20-30	38,51	35,57	8,69	0,03
5	30-40	46,21	40,33	34,61	0,01
6	40-50	51,19	44,89	39,80	0,00
7	50-60	53,54	49,49	16,34	0,00
8	60-70	54,89	54,44	0,20	0,00
9	70-80	56,50	60,19	13,65	0,00
10	80-90	61,88	67,92	36,54	0,00
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,12
obj funcion	25,36	S2 S1 =	24,56	0,02	
ζ	5	ζ S3 =		0,32	
η	1	η S4 =	0,46		



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	2,8	97,8	0,0	0,0	2,8	98,5	0,0
2	5,0	2,9	0,3	7,5	2,6	2,8	0,3	4,0
3	15,0	3,0	0,3	21,3	14,7	3,0	0,1	20,9
4	25,0	3,2	0,3	33,8	24,9	3,2	0,1	33,7
5	35,0	3,3	0,2	45,3	34,9	3,3	0,1	45,2
6	45,0	3,5	0,1	55,7	45,0	3,5	0,1	55,7
7	55,0	3,6	0,1	65,2	55,0	3,6	0,1	65,3
8	65,2	3,8	0,0	74,2	65,1	3,8	0,1	74,1
9	75,0	3,9	0,0	82,2	75,2	3,9	0,1	82,3
10	85,0	4,1	0,1	89,7	85,3	4,1	0,1	89,9
11	95,0	4,2	0,8	96,7	97,7	4,3	0,5	98,5
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 0,5	teor metálico (%) = 0,30	teor metálico (%) = 0,3
densidade outros minerais = 2,8	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 2,8
teor volumétrico = 1,2	teor vol. Balanço fração = 0,6	teor volumétrico beta = 0,8
teor mineral % = 1,3	teor cpy balanço fração % = 0,9	teor mineral (%) = 0,9

Nilce Alves dos Santos

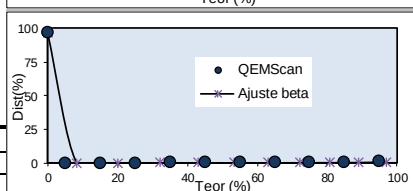
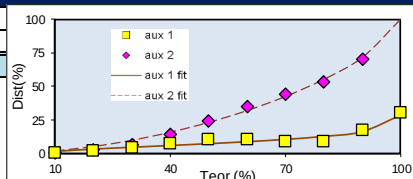
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.35 - Cal 03- Rejeito Rougher 1 - Fração -20 μ m

Dados de entrada calculados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 03	Rej Rougher 1	Fração -20 µm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa Estimada (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	97,0	0,0	-	-	-	-	97,0	0,00	
2	0-10	0,0	5,0	0,75	0,75	1,56	1,56	0,0	6,2	
3	10-20	0,1	15,0	2,07	2,82	4,85	3,29	0,1	15,4	
4	20-30	0,1	25,0	4,02	6,84	9,52	4,67	0,1	25,2	
5	30-40	0,2	35,0	7,33	14,17	15,50	5,99	0,2	35,2	
6	40-50	0,3	45,0	10,27	24,44	22,85	7,34	0,2	45,2	
7	50-60	0,3	55,0	10,55	34,99	31,68	8,83	0,3	55,1	
8	60-70	0,3	65,2	8,78	43,77	42,25	10,57	0,3	65,2	
9	70-80	0,3	75,0	9,19	52,96	55,07	12,82	0,4	75,2	
10	80-90	0,5	85,0	17,33	70,30	71,37	16,30	0,5	85,2	
11	90-100	0,9	95,0	30,16	100,46	100,00	28,63	0,9	96,0	
	100		100,0	-	-	-	-		100,00	
TOTAL		100,0	2,1	0,7			0,7	100,00	2,1	
				0,6			0,6			
							Gama	0,0		

Ajuste com a curva beta					
a	1,60	a ini	1,90	Dens cpy	4,30
b	0,69	b ini	0,80	Dens amostra	3,1
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	0,75	1,56	0,65	0,00
3	10-20	2,82	4,85	4,09	0,00
4	20-30	6,84	9,52	7,14	0,00
5	30-40	14,17	15,50	1,77	0,00
6	40-50	24,44	22,85	2,55	0,01
7	50-60	34,99	31,68	10,98	0,00
8	60-70	43,77	42,25	2,32	0,00
9	70-80	52,96	55,07	4,43	0,01
10	80-90	70,30	71,37	1,15	0,00
11	90-100	100,46	100,00	0,21	0,00
Objetivo		3,53	S2 S1 =	3,53	0,00
$\zeta =$			ζ S3 =		0,00
$\eta =$			η S4 =		0,00



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,1	97,0	0,0	0,0	3,1	97,0	0,0
2	5,0	3,1	0,0	6,8	6,2	3,2	0,0	8,4
3	15,0	3,3	0,1	19,8	15,4	3,3	0,1	20,2
4	25,0	3,4	0,1	31,8	25,2	3,4	0,1	32,0
5	35,0	3,5	0,2	42,9	35,2	3,5	0,2	43,1
6	45,0	3,6	0,3	53,3	45,2	3,6	0,2	53,5
7	55,0	3,8	0,3	63,0	55,1	3,8	0,3	63,2
8	65,2	3,9	0,3	72,3	65,2	3,9	0,3	72,3
9	75,0	4,0	0,3	80,7	75,2	4,0	0,4	80,9
10	85,0	4,1	0,5	88,8	85,2	4,1	0,5	89,0
11	95,0	4,2	0,9	96,4	96,0	4,3	0,9	97,1
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 0,8	teor metálico (%) = 0,79	teor metálico (%) = 0,8
densidade outros minerais = 3,1	val. metal / val. mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,1
teor volumétrico = 2,1	teor vol. Balanço fração = 1,6	teor volumétrico beta = 2,1
teor mineral % = 2,3	teor cpy balanço fração % = 2,3	teor mineral (%) = 2,3

Nilce Alves dos Santos

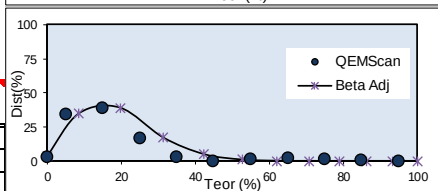
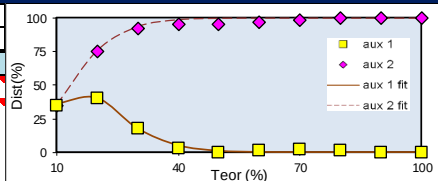
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.36 - Cal 03- Concentrado Rougher 2 - Fração +212 μ m

Dados de entrada calculados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 03	Conc Rg 2		Fração +212 µm								
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa Estimada (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)			
1	0	3,1	0,0	-	-	-	-	3,3	0,00			
2	0-10	33,8	5,0	34,90	34,90	35,83	35,83	34,7	6,1			
3	10-20	38,8	15,0	40,06	74,96	76,12	40,28	39,0	14,5			
4	20-30	16,8	25,0	17,37	92,33	93,77	17,66	17,1	24,1			
5	30-40	2,9	35,0	3,00	95,34	98,85	5,08	4,9	33,8			
6	40-50	0,0	45,0	0,02	95,35	99,86	1,01	1,0	43,5			
7	50-60	1,3	55,0	1,35	96,71	99,99	0,13	0,1	53,2			
8	60-70	1,9	65,2	1,93	98,63	100,00	0,01	0,0	62,8			
9	70-80	1,1	75,0	1,10	99,74	100,00	0,00	0,0	72,2			
10	80-90	0,2	85,0	0,25	99,99	100,00	0,00	0,0	81,5			
11	90-100	0,0	95,0	0,01	100,00	100,00	0,00	0,0	90,7			
	100	0,0	100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,0	15,7	0,2			0,1	100,00	14,1			
				0,0			0,0					
							Gama	7,7				

Ajuste com a curva beta					
a	2,17	aini	1,02	Dens cpy	4,30
b	12,73	bini	5,28	Dens amostra	3,2
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	34,90	35,83	0,87	0,67
3	10-20	74,96	76,12	1,33	0,01
4	20-30	92,33	93,77	2,07	0,06
5	30-40	95,34	98,85	12,34	4,00
6	40-50	95,35	99,86	20,29	0,92
7	50-60	96,71	99,99	10,78	1,40
8	60-70	98,63	100,00	1,86	3,46
9	70-80	99,74	100,00	0,07	1,15
10	80-90	99,99	100,00	0,00	0,06
11	90-100	100,00	100,00	0,00	0,00
obj function		7,81	S2 S1 =	4,96	1,17
$\zeta =$		1	ζ S3 =		1,62
$\eta =$		1	η S4 =	0,06	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	3,1	0,0	0,0	3,0	3,3	0,0
2	5,0	3,0	33,8	7,1	6,1	3,1	34,7	8,6
3	15,0	3,2	38,8	20,3	14,5	3,2	39,0	19,7
4	25,0	3,3	16,8	32,5	24,1	3,3	17,1	31,4
5	35,0	3,4	2,9	43,7	33,8	3,4	4,9	42,4
6	45,0	3,6	0,0	54,1	43,5	3,6	1,0	52,7
7	55,0	3,7	1,3	63,8	53,2	3,7	0,1	62,1
8	65,2	3,8	1,9	73,0	62,8	3,8	0,0	70,9
9	75,0	4,0	1,1	81,2	72,2	3,9	0,0	78,9
10	85,0	4,1	0,2	89,1	81,5	4,1	0,0	86,4
11	95,0	4,2	0,0	96,5	90,7	4,2	0,0	93,4
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,0				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	7,0	teor metálico (%) =	6,04	teor metálico (%) =	6,5
densidade outros minerais =	3,0	val. metal / val. mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	15,7	teor vol. Balanço fração =	12,8	teor volumétrico beta =	14,1
teor mineral % =	20,3	teor cpy balanço fração % =	17,5	teor mineral (%) =	18,7

Nilce Alves dos Santos

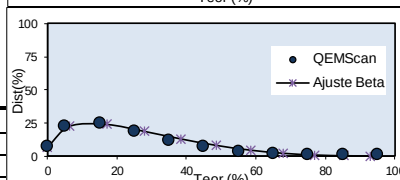
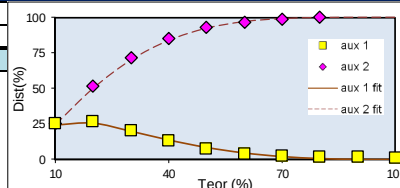
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.37 - Cal 03- Concentrado Rougher 2 - Fração -212+150 μ m

Dados de entrada calculados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 03	Conc Rougher 2	Fração -212 +150µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa ESTIMADA (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	7,2	0,0	-	-	-	-	6,8	0,00
2	0-10	23,0	5,0	24,84	24,84	24,25	24,25	22,6	5,4
3	10-20	24,8	15,0	26,74	51,58	49,88	25,63	23,9	14,9
4	20-30	18,8	25,0	20,27	71,85	69,88	19,99	18,6	24,7
5	30-40	12,3	35,0	13,26	85,10	83,70	13,83	12,9	34,6
6	40-50	7,0	45,0	7,57	92,68	92,28	8,58	8,0	44,6
7	50-60	3,5	55,0	3,80	96,48	96,96	4,68	4,4	54,4
8	60-70	1,8	65,0	1,91	98,39	99,10	2,14	2,0	64,3
9	70-80	1,4	75,0	1,49	99,89	99,84	0,74	0,7	74,0
10	80-90	1,6	85,0	1,71	101,60	99,99	0,15	0,1	83,3
11	90-100	1,0	95,0	1,13	102,73	100,00	0,01	0,0	91,9
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
	TOTAL	102,5	23,5	0,3			0,2	100,00	21,7
				0,1			0,1		
							Gama	-5,4	

Ajuste com a curva beta					
a	1,33	aini	1,04	Dens cpy	4,30
b	4,37	bini	3,05	Dens amostra	3,8
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	24,84	24,25	0,35	0,21
3	10-20	51,58	49,88	2,86	0,85
4	20-30	71,85	69,88	3,87	0,03
5	30-40	85,10	83,70	1,96	0,34
6	40-50	92,68	92,28	0,16	0,93
7	50-60	96,48	96,96	0,24	0,70
8	60-70	98,39	99,10	0,51	0,05
9	70-80	99,89	99,84	0,00	0,49
10	80-90	101,60	99,99	2,58	2,10
11	90-100	102,73	100,00	7,43	1,08
Objetivo		4,88	S2 S1 =	2,00	0,68
$\zeta =$		1	ζ S3 =		2,05
$\eta =$		1	η S4 =	0,15	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,7	7,2	0,0	0,0	3,7	6,8	0,0
2	5,0	3,7	23,0	5,8	5,4	3,7	22,6	6,3
3	15,0	3,8	24,8	17,2	14,9	3,8	23,9	17,0
4	25,0	3,8	18,8	28,2	24,7	3,8	18,6	27,9
5	35,0	3,9	12,3	38,8	34,6	3,9	12,9	38,4
6	45,0	3,9	7,0	49,1	44,6	3,9	8,0	48,6
7	55,0	4,0	3,5	59,0	54,4	4,0	4,4	58,4
8	65,0	4,1	1,8	68,6	64,3	4,1	2,0	67,9
9	75,0	4,1	1,4	77,9	74,0	4,1	0,7	77,0
10	85,0	4,2	1,6	87,0	83,3	4,2	0,1	85,5
11	95,0	4,3	1,0	95,7	91,9	4,2	0,0	93,0
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			102,5				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) =	9,0	teor metálico (%) =	8,83
densidade outros minerais =	3,7	val.metal / val.mineral =	0,35
teor volumétrico =	23,5	teor vol. Balanço fração	22,6
teor mineral % =	25,9	teor cpy balanço fração % =	25,5
		teor metálico (%) =	8,3
		densidade outros minerais =	3,7
		teor volumétrico beta =	21,7
		teor mineral (%) =	24,1

Nilce Alves dos Santos

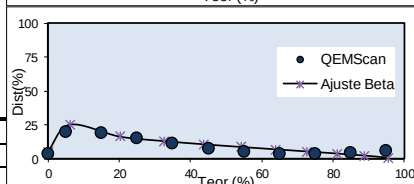
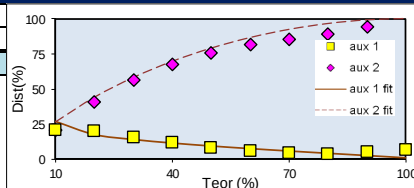
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.38 - Cal 03- Concentrado Rougher 2 - Fração -150+74 μ m

Dados de entrada calculados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 03	Conc Rougher 2		Fração -150 +74µm								
Dados de entrada e funções auxiliares												
bin		mass%	aux1		aux2		aux2 fit		aux1 fit		dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa Estimada (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)		
1	0	3,6	0,0	-	-	-	-	5,2	0,00			
2	0-10	19,9	5,0	20,64	20,64	26,85	26,85	25,5	4,3			
3	10-20	19,2	15,0	19,90	40,54	44,34	17,49	16,6	14,8			
4	20-30	15,2	25,0	15,72	56,27	58,31	13,97	13,2	24,8			
5	30-40	11,2	35,0	11,63	67,89	69,75	11,43	10,8	34,8			
6	40-50	7,9	45,0	8,17	76,07	79,08	9,34	8,9	44,8			
7	50-60	5,4	55,0	5,60	81,67	86,56	7,48	7,1	54,8			
8	60-70	3,9	65,0	4,07	85,74	92,34	5,78	5,5	64,8			
9	70-80	3,6	75,0	3,70	89,43	96,50	4,16	3,9	74,7			
10	80-90	4,4	85,0	4,58	94,02	99,07	2,57	2,4	84,5			
11	90-100	5,9	95,0	6,07	100,09	100,00	0,93	0,9	93,5			
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00			
TOTAL		100,1	32,6	0,3			0,3	100,00	27,8			
							0,1					
							Gama =	45,2				

Ajuste com a curva beta					
a	0,78	aini	0,69	Dens cpy	4,30
b	1,89	bini	1,35	Dens amostra	3,3
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	20,64	26,85	38,58	30,87
3	10-20	40,54	44,34	14,44	6,80
4	20-30	56,27	58,31	4,18	3,68
5	30-40	67,89	69,75	3,43	0,14
6	40-50	76,07	79,08	9,09	0,94
7	50-60	81,67	86,56	23,95	2,86
8	60-70	85,74	92,34	43,57	2,41
9	70-80	89,43	96,50	49,86	0,14
10	80-90	94,02	99,07	25,51	3,92
11	90-100	100,09	100,00	0,01	24,69
Objetivo		35,22	S2 S1 =	21,26	7,64
$\zeta =$		5	ζ S3 =		3,70
$\eta =$		1	η S4 =	2,61	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	3,6	0,0	0,0	3,0	5,2	0,0
2	5,0	3,0	19,9	7,1	4,3	3,0	25,5	6,2
3	15,0	3,2	19,2	20,4	14,8	3,2	16,6	20,2
4	25,0	3,3	15,2	32,7	24,8	3,3	13,2	32,5
5	35,0	3,4	11,2	43,9	34,8	3,4	10,8	43,8
6	45,0	3,6	7,9	54,4	44,8	3,6	8,9	54,2
7	55,0	3,7	5,4	64,0	54,8	3,7	7,1	63,8
8	65,0	3,8	3,9	73,0	64,8	3,8	5,5	72,8
9	75,0	4,0	3,6	81,4	74,7	4,0	3,9	81,1
10	85,0	4,1	4,4	89,2	84,5	4,1	2,4	88,8
11	95,0	4,2	5,9	96,5	93,5	4,2	0,9	95,4
	100,0	4,3	0,0	100,0	100,0	4,3	0,0	100,0
			100,1				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 13,3	teor metálico (%) = 11,28	teor metálico (%) = 11,6
densidade outros minerais = 3,0	val. metal / val. mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 32,6	teor vol. Balanço fração = 25,0	teor volumétrico beta = 27,8
teor mineral % = 38,3	teor cpy balanço fração % = 32,6	teor mineral (%) = 33,5

Nilce Alves dos Santos

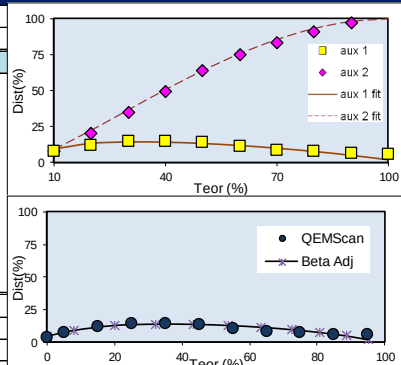
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.39 - Cal 03- Concentrado Rougher 2 - Fração -74+44 μ m

Dados de entrada calculados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 03	Conc Rg2	Fração -74 +44µm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa ESTIMADA (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	3,7	0,0	-	-	-	-	4,4	0,00	
2	0-10	7,7	5,0	7,97	7,97	9,28	9,28	8,9	5,7	
3	10-20	11,7	15,0	12,11	20,09	22,50	13,22	12,6	15,1	
4	20-30	13,9	25,0	14,48	34,56	36,71	14,21	13,6	25,0	
5	30-40	14,4	35,0	14,90	49,47	50,78	14,07	13,4	35,0	
6	40-50	13,6	45,0	14,10	63,56	63,97	13,19	12,6	44,9	
7	50-60	10,7	55,0	11,09	74,65	75,74	11,77	11,2	54,9	
8	60-70	8,1	65,0	8,42	83,07	85,63	9,89	9,5	64,8	
9	70-80	7,1	75,0	7,35	90,42	93,24	7,61	7,3	74,7	
10	80-90	6,1	85,0	6,31	96,73	98,18	4,94	4,7	84,5	
11	90-100	5,6	95,0	5,77	102,50	100,00	1,82	1,7	93,4	
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00	
TOTAL		102,4	43,7	0,5			0,4	100,00	39,5	
				0,3			0,2			
							Gama	21.25		

Ajuste com a curva beta					
a	1,36	aini	1,37	Dens cpy	4,30
b	1,93	bini	1,66	Dens amostra	3,5
Classe	Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1
2	0-10	7,97	9,28	1,70	1,40
3	10-20	20,09	22,50	5,80	0,93
4	20-30	34,56	36,71	4,60	0,13
5	30-40	49,47	50,78	1,71	0,84
6	40-50	63,56	63,97	0,16	0,95
7	50-60	74,65	75,74	1,19	0,32
8	60-70	83,07	85,63	6,58	1,80
9	70-80	90,42	93,24	7,98	0,04
10	80-90	96,73	98,18	2,11	1,85
11	90-100	102,50	100,00	6,26	14,62
Objetivo		7,41	S2 S1 =	3,81	
ζ =		5	ζ S3 =	0,71	
η =		1	η S4 =	0,61	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	3,7	0,0	0,0	3,0	4,4	0,0
2	5,0	3,1	7,7	7,0	5,7	3,1	8,9	7,9
3	15,0	3,2	11,7	20,1	15,1	3,2	12,6	20,2
4	25,0	3,3	13,9	32,2	25,0	3,3	13,6	32,2
5	35,0	3,5	14,4	43,4	35,0	3,5	13,4	43,4
6	45,0	3,6	13,6	53,8	44,9	3,6	12,6	53,7
7	55,0	3,7	10,7	63,5	54,9	3,7	11,2	63,4
8	65,0	3,9	8,1	72,6	64,8	3,8	9,5	72,4
9	75,0	4,0	7,1	81,0	74,7	4,0	7,3	80,8
10	85,0	4,1	6,1	89,0	84,5	4,1	4,7	88,6
11	95,0	4,2	5,6	96,4	93,4	4,2	1,7	95,3
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
102,4				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação	relações entre dados volume/massa	Depois do ajuste beta
teor metálico (%) = 17,3	teor metálico (%) = 16,55	teor metálico (%) = 15,9
densidade outros minerais = 3,0	val.metal / val.mineral = 0,35	densidade outros minerais = 3,0
teor volumétrico = 43,7	teor vol. Balanço fração = 39,1	teor volumétrico beta = 39,5
teor mineral % = 50,1	teor cpy balanço fração % = 47,8	teor mineral (%) = 45,9

A-V.3.40 - Cal 03- Concentrado Rougher 2 - Fração -44+20 μ m

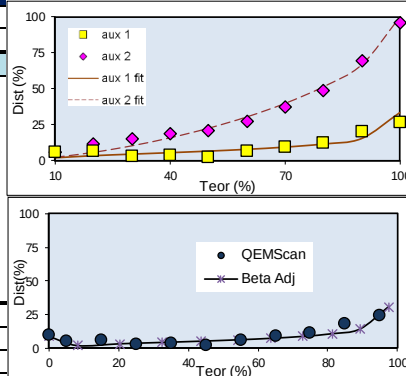
Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Dados de entrada calculados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 03	Conc Rg2	Fração -44 +20 µm						
Dados de entrada e funções auxiliares									
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada	
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa Estimada (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista beta,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista beta,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)
1	0	9,3	0,0	-	-	-	-	8,7	0,00
2	0-10	5,0	5,0	5,53	5,53	1,99	1,99	1,8	5,9
3	10-20	5,6	15,0	6,22	11,75	5,47	3,48	3,2	15,3
4	20-30	2,9	25,0	3,19	14,94	10,03	4,56	4,2	25,2
5	30-40	3,4	35,0	3,78	18,72	15,61	5,58	5,1	35,2
6	40-50	1,9	45,0	2,06	20,78	22,27	6,66	6,1	45,1
7	50-60	6,1	55,0	6,70	27,47	30,17	7,90	7,2	55,1
8	60-70	8,7	65,2	9,55	37,02	39,62	9,45	8,6	65,2
9	70-80	10,9	75,0	11,98	49,00	51,23	11,61	10,6	75,2
10	80-90	18,3	85,0	20,13	69,13	66,60	15,37	14,0	85,3
11	90-100	24,3	95,0	26,85	95,98	100,00	33,40	30,5	96,4
	100		100,0	-	-	-	-	0,0	100,00
	TOTAL	96,4	59,6	0,7			0,7	100,00	65,1
				0,5			0,6		
							Gama	-6,45	

Ajuste com a curva beta					
a	1,42	a ini	0,89	Dens cpy	4,30
b	0,57	b ini	0,46	Dens amostra	3,8
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	5,53	1,99	12,49	10,20
3	10-20	11,75	5,47	39,34	6,06
4	20-30	14,94	10,03	24,06	1,60
5	30-40	18,72	15,61	9,63	2,78
6	40-50	20,78	22,27	2,24	17,73
7	50-60	27,47	30,17	7,29	1,30
8	60-70	37,02	39,62	6,74	0,00
9	70-80	49,00	51,23	4,98	0,07
10	80-90	69,13	66,60	6,42	17,88
11	90-100	95,98	100,00	16,16	37,75
obj funtor		23,04	S2 S1 =	12,94	9,54
ζ =		5	ζ S3 =		0,21
η =		1	η S4 =	0,36	



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,0	9,3	0,0	0,0	3,0	8,7	0,0
2	5,0	3,1	5,0	7,0	5,9	3,1	1,8	8,2
3	15,0	3,2	5,6	20,2	15,3	3,2	3,2	20,5
4	25,0	3,3	2,9	32,3	25,2	3,3	4,2	32,5
5	35,0	3,5	3,4	43,6	35,2	3,5	5,1	43,7
6	45,0	3,6	1,9	54,0	45,1	3,6	6,1	54,1
7	55,0	3,7	6,1	63,7	55,1	3,7	7,2	63,8
8	65,2	3,8	8,7	72,9	65,2	3,8	8,6	72,8
9	75,0	4,0	10,9	81,1	75,2	4,0	10,6	81,3
10	85,0	4,1	18,3	89,0	85,3	4,1	14,0	89,3
11	95,0	4,2	24,3	96,5	96,4	4,3	30,5	97,5
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			96,4				100,0	

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	22,0	teor metálico (%) =	24,09	teor metálico (%) =	24,0
densidade outros minerais =	3,0	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,0
teor volumétrico =	59,6	teor vol. Balanço fração =	61,5	teor volumétrico beta =	65,1
teor mineral % =	63,6	teor cpy balanço fração % =	69,6	teor mineral (%) =	69,4

Nilce Alves dos Santos

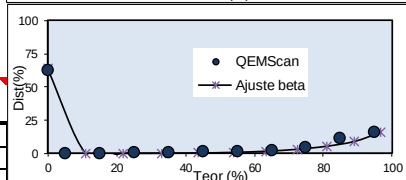
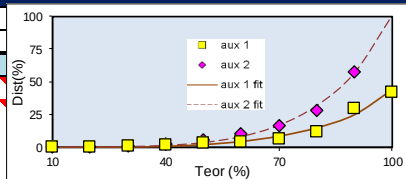
Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.3.41 - Cal 03- Concentrado Rougher 2 - Fração -20 μ m

Dados de entrada calculados por balanço prévio com distribuições beta dos outros produtos

Ensaio	Cal 03	Conc Rougher 2	Fração -20 µm							
Dados de entrada e funções auxiliares										
	bin	mass%		aux1	aux2	aux2 fit	aux1 fit	dist ajustada		
Classe j	Classe QEMScan por teor volumétrico cpy (%)	Distribuição em massa Estimada (%)	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Dist auxiliar simples sem ganga - f _m mista,j	Dist auxiliar sem ganga acumulada - F _m mista,j	Dist auxiliar acumulada calculada beta- F _m mista,j	Dist auxiliar simples calculada beta- f _m mista,j	Dist simples calculada beta- f _m beta,j	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	
1	0	62,4	0,0	-	-	-	-	63,7	0,00	
2	0-10	0,0	5,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	8,2	
3	10-20	0,1	15,0	0,16	0,16	0,05	0,04	0,0	16,8	
4	20-30	0,3	25,0	0,77	0,93	0,31	0,26	0,1	26,2	
5	30-40	0,6	35,0	1,70	2,63	1,17	0,87	0,3	35,9	
6	40-50	1,1	45,0	2,91	5,54	3,34	2,17	0,8	45,7	
7	50-60	1,6	55,0	4,35	9,89	7,90	4,56	1,7	55,6	
8	60-70	2,4	65,2	6,31	16,20	16,47	8,57	3,1	65,5	
9	70-80	4,5	75,0	12,01	28,21	31,38	14,91	5,4	75,4	
10	80-90	11,1	85,0	29,66	57,87	56,22	24,84	9,0	85,4	
11	90-100	15,8	95,0	42,14	100,01	100,00	43,78	15,9	95,6	
	100		100,0	-	-	-	-	-	100,00	
TOTAL		100,0	31,1	0,8			0,8	100,00	30,5	
				0,7		0,7				
							Gama	2,0		

Ajuste com a curva beta					
a	4,63	a ini	4,12	Dens cpy	4,30
b	0,89	b ini	0,85	Dens amostra	3,4
Bin	aux2	aux2 fit	SQ aux2	SQ aux1	
2	0-10	0,00	0,00	0,00	
3	10-20	0,16	0,05	0,01	
4	20-30	0,93	0,31	0,40	
5	30-40	2,63	1,17	2,14	
6	40-50	5,54	3,34	4,87	
7	50-60	9,89	7,90	3,97	
8	60-70	16,20	16,47	0,07	
9	70-80	28,21	31,38	10,06	
10	80-90	57,87	56,22	2,72	
11	90-100	100,01	100,00	0,00	
Objetivo		3,03	S2 S1 =	2,42	0,61
$\zeta =$			ζ S3 =		0,00
$\eta =$			η S4 =		0,00



Reconciliação do teor global, distribuição simples ajustada da liberação s e teor calculado por classe								
Classe	Teor volumétrico médio inicial cpy (%)	Densidade da classe	Distribuição em massa QEMScan (%)	Teor médio mássico inicial cpy (%)	Teor volumétrico médio beta inicial cpy (%)	Densidade da classe	Dist simples calculada beta- f_m beta,j	Teor mássico médio beta calculado cpy (%)
1	0,0	3,1	62,4	0,0	0,0	3,1	63,7	0,0
2	5,0	3,2	0,0	6,8	8,2	3,2	0,0	11,1
3	15,0	3,3	0,1	19,7	16,8	3,3	0,0	21,9
4	25,0	3,4	0,3	31,6	26,2	3,4	0,1	33,0
5	35,0	3,5	0,6	42,8	35,9	3,5	0,3	43,7
6	45,0	3,6	1,1	53,2	45,7	3,6	0,8	53,8
7	55,0	3,8	1,6	62,9	55,6	3,8	1,7	63,4
8	65,2	3,9	2,4	72,2	65,5	3,9	3,1	72,5
9	75,0	4,0	4,5	80,6	75,4	4,0	5,4	81,0
10	85,0	4,1	11,1	88,7	85,4	4,1	9,0	89,0
11	95,0	4,2	15,8	96,3	95,6	4,2	15,9	96,8
	100,0	4,3		100,0	100,0	4,3		100,0
			100,0					
				100,0				

Antes do ajuste beta, dados de liberação		relações entre dados volume/massa		Depois do ajuste beta	
teor metálico (%) =	11,2	teor metálico (%) =	10,96	teor metálico (%) =	11,0
densidade outros minerais =	3,1	val.metal / val.mineral =	0,35	densidade outros minerais =	3,1
teor volumétrico =	31,1	teor vol. Balanço fração	25,1	teor volumétrico beta =	30,5
teor mineral % =	32,5	teor cov balanço fração % =	31,7	teor mineral (%) =	31,7

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.4 - Ensaio Cal 01 – Planilhas Consolidadas de Cálculo Beta

A-V.4.1 - Cal 01- Teores mássicos médios de calcopirita obtidos por ajuste beta para cada classe

Tamanho (μm)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
	CAL 1- Teores mássicos médios de calcopirita obtidos por ajuste beta para cada classe										
212	0%	6,5%	19,5%	31,6%	42,8%	53,1%	62,7%	71,5%	79,7%	86,9%	94,1%
150	0%	5,5%	20,0%	32,2%	43,4%	53,8%	63,4%	72,4%	80,7%	88,4%	95,0%
74	0%	5,8%	19,8%	32,0%	43,2%	53,6%	63,2%	72,2%	80,6%	88,3%	95,7%
44	0%	6,3%	20,1%	32,3%	43,5%	53,9%	63,6%	72,6%	80,9%	88,6%	95,9%
20	0%	5,8%	20,2%	32,5%	43,8%	54,2%	63,9%	72,9%	81,3%	89,1%	97,2%
<20	0%	5,8%	20,2%	32,5%	43,8%	54,2%	63,9%	72,9%	81,3%	89,1%	97,2%

Estes teores correspondem à média de teores *mássicos calculados pela função beta* por classe em todos os produtos ajustados pela função beta. Assim, por exemplo o valor de uma classe é a média dos teores obtidos naquela classe para o concentrado rougher 1, concentrado scavenger, concentrado cleaner, rejeito cleaner, etc.

Estes teores foram também usados como *base inicial* nos balanços por classe. Os valores foram mantidos na quase totalidade das classes. A seção de balanço de massas contém as tabelas finais dos teores balanceados de cada classe.

A-V.4.2 - Cal 01- Alimentação – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 01 - Alimentação - Soma dos produtos															
					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das particulares										
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
i	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	12,96	2,47	2,42	91,29	1,97	2,39	1,87	1,31	0,75	0,31	0,09	0,02	0,00	0,00
2	150	16,43	4,33	4,72	83,26	7,35	1,93	1,82	1,62	1,36	1,07	0,78	0,49	0,24	0,06
3	74	19,17	5,67	5,70	86,40	3,78	1,46	1,25	1,23	1,21	1,17	1,11	1,00	0,85	0,54
4	44	15,50	7,35	7,41	87,66	1,85	0,98	0,81	0,78	0,81	0,87	0,95	1,09	1,36	2,84
5	20	20,55	9,52	9,48	87,01	1,16	0,65	0,59	0,58	0,60	0,65	0,73	0,88	1,22	5,93
6	<20	15,39	5,72	5,79	93,25	0,28	0,17	0,15	0,14	0,14	0,15	0,16	0,18	0,48	4,90

A-V.4.3 - Cal 01- Concentrado Rougher 1 – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 01 - Concentrado Rougher 1															
					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
i	Tamanho partícula (µm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	9,87	26,96	26,93	2,36	22,11	27,61	21,39	13,78	7,60	3,51	1,28	0,32	0,04	0,00
2	150	15,45	39,10	39,77	2,77	13,51	16,56	16,05	14,42	12,22	9,74	7,17	4,65	2,36	0,56
3	74	19,25	48,41	49,04	3,87	11,07	11,23	11,07	10,80	10,44	10,00	9,45	8,73	7,71	5,63
4	44	15,80	64,59	64,95	5,80	5,21	5,52	5,86	6,26	6,77	7,42	8,33	9,72	12,36	26,76
5	20	22,85	73,70	73,32	7,65	1,88	2,80	3,45	4,11	4,85	5,76	7,01	8,93	12,68	40,89
6	9	16,78	35,98	35,63	58,11	1,30	1,03	1,01	1,06	1,16	1,32	1,57	2,04	3,13	28,26

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.4.4 - Cal 01- Rejeito Rougher 2 – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 01 - Rejeito Rougher 2					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
i	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
					Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	13,40	0,29	0,28	99,40	0,00	0,01	0,10	0,22	0,19	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00
2	150	16,59	0,25	0,62	92,72	6,66	0,22	0,12	0,08	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01
3	74	19,16	0,24	0,30	96,23	3,30	0,40	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	44	15,52	0,18	0,23	98,03	1,42	0,37	0,13	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	20	20,31	0,33	0,27	98,61	0,79	0,22	0,14	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00
6	OF	15,02	0,98	0,98	98,35	0,24	0,14	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14	0,17	0,36

A-V.4.5 - Cal 01- Concentrado Scavenger – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 01 - Concentrado Scavenger					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
i	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
					Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	9,32	2,31	4,89	31,21	65,77	2,72	0,27	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	150	3,51	10,24	11,45	30,97	37,82	15,80	8,19	4,14	1,93	0,80	0,27	0,07	0,01	0,00
3	74	4,52	11,74	12,03	39,41	27,60	15,01	8,81	4,93	2,53	1,15	0,43	0,12	0,02	0,00
4	44	3,90	7,68	7,85	65,64	14,18	8,05	5,16	3,24	1,93	1,05	0,50	0,19	0,05	0,00
5	20	19,24	4,90	5,24	83,81	4,60	3,13	2,44	1,91	1,47	1,09	0,76	0,48	0,24	0,06
6	OF	59,51	3,40	3,38	95,24	0,76	0,21	0,17	0,15	0,14	0,15	0,17	0,20	0,29	2,52

A-V.4.6 - Cal 01- Concentrado Cleaner – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 01 - Concentrado Cleaner					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
i	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
					Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	10,21	27,13	26,66	1,53	22,42	28,69	21,91	13,70	7,24	3,17	1,07	0,25	0,03	0,00
2	150	16,24	40,24	40,89	1,93	12,03	16,39	16,50	15,09	12,87	10,24	7,44	4,71	2,29	0,50
3	74	20,47	49,13	48,98	10,28	6,49	9,04	10,05	10,53	10,66	10,50	10,06	9,26	7,94	5,19
4	44	16,88	65,20	65,26	5,74	4,97	5,42	5,81	6,26	6,79	7,47	8,40	9,82	12,49	26,83
5	20	23,06	78,91	79,02	2,20	3,46	3,21	3,33	3,57	3,94	4,49	5,33	6,80	10,03	53,65
6	OF	13,14	50,95	51,90	46,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,93	50,69

A-V.4.7 - Cal 01- Rejeito Cleaner – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 01 - Rejeito Cleaner					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
i	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
					Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	5,59	19,92	20,03	5,10	36,44	27,51	16,36	8,59	3,94	1,52	0,46	0,09	0,01	0,00
2	150	9,09	29,14	29,96	5,03	26,22	19,20	15,02	11,63	8,74	6,27	4,16	2,43	1,09	0,22
3	74	12,39	36,66	37,05	5,08	17,54	16,37	14,56	12,62	10,62	8,60	6,58	4,58	2,64	0,81
4	44	6,70	47,71	48,87	4,14	8,97	11,35	11,96	11,98	11,62	10,95	9,96	8,62	6,76	3,69
5	20	18,87	44,61	45,36	22,56	6,14	7,02	7,40	7,65	7,85	8,02	8,16	8,28	8,40	8,53
6	OF	47,35	13,09	12,97	82,39	1,44	0,88	0,80	0,79	0,81	0,88	1,00	1,22	1,72	8,07

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.4.8 - Cal 01- Rejeito Rougher 1 – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 01 - Rejeito Rougher 1					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
i	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
					Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	13,31	0,43	0,36	98,77	0,26	0,33	0,27	0,18	0,11	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00
2	150	16,54	0,68	1,04	91,78	6,58	0,55	0,32	0,22	0,17	0,13	0,10	0,07	0,05	0,03
3	74	19,16	0,84	0,85	95,69	2,90	0,37	0,23	0,18	0,14	0,12	0,11	0,09	0,09	0,08
4	44	15,47	0,77	0,80	97,05	1,54	0,34	0,23	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08
5	20	20,29	1,39	1,13	97,75	0,67	0,18	0,14	0,12	0,11	0,11	0,12	0,13	0,17	0,51
6	-20	15,23	1,97	1,58	97,38	0,51	0,19	0,15	0,14	0,13	0,13	0,14	0,17	0,22	0,83

A-V.4.9 - Cal 01- Concentrado Rougher 2 – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 01 - Concentrado Rougher 2					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
i	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
					Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	6,62	20,87	20,74	3,82	26,25	37,85	21,40	8,07	2,17	0,40	0,04	0,00	0,00	0,00
2	150	12,90	40,81	40,41	0,13	10,39	17,78	18,92	17,19	14,00	10,23	6,54	3,42	1,23	0,16
3	74	19,44	44,04	44,21	3,19	16,15	13,13	11,86	10,88	10,00	9,15	8,27	7,29	6,07	3,99
4	44	11,82	58,26	56,97	3,06	5,89	8,33	9,48	10,21	10,70	10,98	11,08	10,96	10,49	8,83
5	20	18,98	83,99	82,27	2,22	4,78	2,60	2,32	2,27	2,37	2,60	3,03	3,86	5,88	68,07
6	9	30,23	38,03	37,04	60,15	0,00	0,03	0,09	0,21	0,42	0,76	1,34	2,37	4,65	29,99

A-V.5 - Ensaio Cal 02 – Planilhas Consolidadas de Cálculo Beta

A-V.5.1 - Cal 02- Teores mássicos médios de calcopirita obtidos por ajuste beta para cada classe

Tamanho (μm)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
CAL 2- Teores mássicos médios de calcopirita obtidos por ajuste beta para cada classe											
212	0%	5,0%	19,0%	31,1%	42,2%	52,6%	62,2%	71,1%	79,4%	87,1%	93,8%
150	0%	6,0%	19,9%	32,0%	43,2%	53,6%	63,3%	72,3%	80,7%	88,5%	95,1%
74	0%	6,3%	20,0%	32,1%	43,3%	53,7%	63,4%	72,3%	80,7%	88,4%	95,1%
44	0%	6,6%	20,2%	32,3%	43,5%	53,9%	63,6%	72,6%	81,0%	88,9%	96,4%
20	0%	6,6%	20,6%	32,9%	44,2%	54,6%	64,2%	73,2%	81,5%	89,3%	97,4%
OF	0%	8,2%	20,9%	32,9%	44,1%	54,4%	64,1%	73,1%	81,5%	89,3%	97,5%

Estes teores correspondem à média de teores *mássicos calculados pela função beta* por classe em todos os produtos ajustados pela função beta. Assim, o valor de uma classe é a média dos teores obtidos naquela classe para o concentrado rougher 1, concentrado scavenger, concentrado cleaner, rejeito cleaner, etc.

Estes teores foram também usados como *base inicial* nos balanços por classe. Os valores foram mantidos na quase totalidade das classes. A seção de balanço de massas contém as tabelas finais dos teores balanceados de cada classe.

A-V.5.2 - Cal 02- Alimentação – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Uma vez que foram invalidadas as análises de QEMScan das frações acima de 74 μm para concentrado e rejeito cleaner, não foi possível calcular diretamente os valores de ajuste beta de alimentação teste CAL 02 para estas frações. Os dados utilizados para obter os valores da alimentação correspondem a valores equivalentes de ajuste beta CAL 01 e CAL 03 ou à média deles. A escolha foi feita de acordo com a maior compatibilidade da série de dados de CAL 1 ou CAL3 em relação aos teores de calcopirita da fração granulométrica equivalente em CAL 02.

Cal 02 - Alimentação					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas											
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
i	Tamanho partícula (µm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação											
	212	13,87	1,91	2,18	88,86	5,32	2,41	1,47	0,90	0,53	0,29	0,14	0,06	0,01	0,00	
	150	16,61	4,38	4,24	87,76	3,76	1,67	1,55	1,39	1,19	1,01	0,79	0,53	0,25	0,09	
	74	23,12	6,31	6,24	86,76	2,02	1,71	1,56	1,52	1,45	1,33	1,20	1,02	0,83	0,60	
	44	14,00	7,36	7,45	87,61	2,61	0,61	0,58	0,60	0,66	0,74	0,85	1,02	1,35	3,35	
	20	17,09	10,60	10,43	86,90	0,53	0,46	0,45	0,48	0,54	0,64	0,80	1,10	1,71	6,39	
	OF	15,31	5,76	5,59	93,60	0,08	0,11	0,13	0,15	0,18	0,22	0,28	0,37	0,58	4,29	
	Total	100,00		6,18												

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Tamanho partícula (µm)	Origem
212	Ajuste beta com base em Cal 01
150	Média dos balanços de cal 1 e cal 3
74	Igual a Cal 03
44	Soma de produtos Cal 02
20	Soma de produtos Cal 02
-20	Ajuste beta com base em Cal 01

A-V.5.3 - Cal 02- Conc Rougher 1 – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 02 -Concentrado Rougher 1																
					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas											
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
i	Tamanho partícula (µm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação											
1	212	7,75	28,74	30,71	2,80	12,84	24,91	23,83	17,47	10,50	5,14	1,94	0,50	0,06	0,00	
2	150	16,83	41,57	42,63	3,89	9,91	14,50	15,31	14,62	13,03	10,87	8,35	5,68	3,05	0,79	
3	74	25,48	56,16	56,29	4,02	5,00	7,95	9,47	10,45	11,08	11,41	11,44	11,10	10,21	7,77	
4	44	14,12	72,96	71,83	4,14	1,53	3,14	4,41	5,62	6,87	8,26	9,91	12,08	15,52	28,52	
5	20	21,10	82,68	82,34	2,45	0,58	1,43	2,23	3,11	4,13	5,40	7,09	9,65	14,53	49,40	
6	9	14,72	48,63	48,35	48,03	0,00	0,03	0,11	0,26	0,54	1,02	1,82	3,27	6,44	38,48	

A-V.5.4 - Cal 02- Rejeito Rougher 2 – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 02 -Rejeito Rougher 2					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
i	Tamanho partícula (µm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	14,59	0,27	0,33	94,77	4,78	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	150	16,70	0,28	0,64	92,32	7,16	0,19	0,10	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01
3	74	22,98	0,25	0,43	95,26	4,15	0,34	0,14	0,06	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
4	44	14,09	0,22	0,32	96,94	2,59	0,23	0,11	0,06	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
5	20	16,69	0,44	0,38	98,74	0,42	0,25	0,19	0,14	0,10	0,07	0,05	0,03	0,01	0,00
6	9	14,96	0,93	0,94	98,19	0,25	0,21	0,20	0,19	0,18	0,18	0,17	0,16	0,15	0,13

A-V.5.5 - Cal 02- Conc Scavenger – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 02 -Concentrado Scavenger																
					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas											
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
i	Tamanho partícula (µm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação											
1	212	4,38	3,58	6,63	15,39	73,85	6,16	2,56	1,17	0,53	0,23	0,08	0,02	0,00	0,00	
2	150	3,90	18,52	19,28	16,63	34,40	18,79	12,25	7,93	4,92	2,84	1,45	0,61	0,17	0,02	
3	74	5,66	24,55	25,29	14,70	25,40	18,26	13,80	10,25	7,32	4,93	3,03	1,60	0,61	0,09	
4	44	3,66	23,36	26,53	32,50	13,68	11,37	9,84	8,48	7,19	5,92	4,68	3,42	2,14	0,78	
5	20	16,14	12,85	14,34	59,25	11,48	7,08	5,58	4,54	3,70	2,96	2,30	1,67	1,05	0,39	
6	9	66,26	6,07	6,11	89,04	0,89	1,11	1,19	1,23	1,24	1,22	1,19	1,12	1,01	0,75	

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.6 - Ensaio Cal 03 – Planilhas Consolidadas de Cálculo Beta

A-V.6.1 - Cal 03- Teores mássicos médios de calcopirita obtidos por ajuste beta para cada classe

Estes teores correspondem à média de teores **mássicos** calculados pela função beta por classe em todos os produtos ajustados pela função beta. Assim, por exemplo o valor de uma classe é a média dos teores obtidos naquela classe para o concentrado rougher 1, concentrado scavenger, concentrado cleaner, rejeito cleaner, etc.

Estes teores foram também usados como *base inicial* nos balanços por classe. Estes valores foram mantidos na quase totalidade das classes. A seção de balanço de massas contém as tabelas finais dos teores de cada classe.

CAL 03 - Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Tamanho (μm)	Teores mássicos médios de calcopirita obtidos por ajuste beta para cada classe										
212	0%	3,0%	19,0%	29,8%	40,3%	50,3%	59,8%	68,9%	77,5%	85,7%	94,3%
150	0%	6,9%	20,2%	32,3%	43,5%	53,9%	63,5%	72,5%	80,8%	88,5%	95,5%
74	0%	6,7%	20,2%	32,4%	43,6%	54,0%	63,6%	72,5%	80,8%	88,5%	95,2%
44	0%	5,9%	19,4%	31,4%	42,6%	53,0%	62,7%	71,7%	80,3%	88,3%	96,9%
20	0%	6,5%	20,3%	32,6%	43,9%	54,3%	63,9%	72,9%	81,3%	89,1%	96,8%
OF	0%	9,0%	20,6%	31,9%	42,6%	52,8%	62,4%	71,5%	80,1%	88,3%	96,5%

A-V.6.2 - Cal 03- Conc Rougher 1 – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 03 - Concentrado Rougher 1					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
i	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	7,6	38,5	36,6	1,0	3,4	16,8	25,8	24,4	16,6	8,3	2,9	0,6	0,1	0,0
2	150	14,2	51,0	51,4	1,6	3,7	9,7	13,6	15,5	15,7	14,4	11,8	8,4	4,6	1,1
3	74	26,2	55,2	56,2	2,5	5,6	8,6	10,1	10,9	11,4	11,6	11,5	10,9	9,8	7,0
4	44	17,2	73,7	73,8	3,3	2,9	3,7	4,2	4,7	5,4	6,2	7,4	9,2	12,8	40,2
5	20	24,4	84,6	81,6	5,5	2,0	1,9	2,0	2,2	2,5	2,9	3,5	4,7	7,3	65,4
6	-20	10,4	70,9	68,5	29,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	70,7

A-V.6.3 - Cal 03- Conc Scavenger – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 03 - Concentrado Scavenger					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
i	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	5,4	4,5	5,5	4,81	83,5	7,2	2,7	1,12	0,44	0,16	0,05	0,01	0,00	0,00
2	150	3,1	18,0	18,4	10,1	35,1	28,4	15,6	7,13	2,72	0,83	0,18	0,02	0,00	0,00
3	74	2,5	19,6	20,9	21,2	26,9	18,3	12,9	8,8	5,7	3,4	1,8	0,8	0,2	0,0
4	44	6,7	13,5	15,1	34,1	30,8	12,1	8,0	5,5	3,8	2,6	1,7	0,9	0,4	0,1
5	20	16,5	9,1	9,8	75,0	5,1	4,3	3,7	3,2	2,7	2,2	1,7	1,2	0,8	0,3
6	9	65,7	4,4	4,7	91,9	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8

A-V.6.4 - Cal 03- Rejeito Scavenger – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Cal 03 - Rejeito Scavenger					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
<i>i</i>	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	14,9	0,3	0,2	94,41	5,3	0,3	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	150	17,0	0,3	0,5	93,8	5,8	0,4	0,0	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	74	21,1	0,2	0,2	96,8	3,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	44	15,4	0,1	0,2	97,9	1,7	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	20	17,6	0,1	0,2	99,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	9	14,1	0,4	0,5	99,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0

A-V.6.5 - Cal 03- Concentrado Cleaner – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 03 - Concentrado Cleaner					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
<i>i</i>	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	8,8	33,2	32,4	1,11	11,7	22,4	22,6	18,15	12,34	7,09	3,29	1,11	0,21	0,01
2	150	14,4	47,7	48,5	2,3	6,0	11,7	14,2	14,95	14,38	12,81	10,46	7,56	4,33	1,22
3	74	27,4	51,7	54,5	3,0	8,1	9,5	10,0	10,3	10,4	10,4	10,3	10,1	9,7	8,4
4	44	16,4	71,8	72,6	2,5	2,7	3,9	4,7	5,4	6,3	7,3	8,6	10,5	14,0	34,2
5	20	22,5	86,1	85,6	2,2	0,6	1,2	1,7	2,2	2,9	3,7	4,9	6,9	11,0	62,9
6	9	10,5	73,9	72,3	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	4,8	70,1

A-V.6.6 - Cal 03- Rejeito Cleaner – Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 03 - Rejeito Cleaner					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
<i>i</i>	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	6,5	23,8	22,4	1,86	27,4	29,1	20,2	11,88	5,98	2,50	0,82	0,18	0,02	0,00
2	150	10,1	29,6	31,3	5,9	20,3	20,5	17,2	13,39	9,73	6,51	3,87	1,91	0,65	0,08
3	74	14,6	37,3	41,4	6,4	12,3	14,2	13,9	12,9	11,5	9,9	8,0	5,9	3,7	1,3
4	44	7,3	55,3	55,6	8,9	8,4	7,4	7,3	7,3	7,5	7,8	8,3	9,1	10,6	17,2
5	20	20,2	55,6	56,7	13,0	6,0	6,2	6,4	6,7	7,1	7,6	8,2	9,2	11,0	18,7
6	OF	41,4	19,7	20,4	74,9	0,1	0,3	0,6	1,0	1,4	1,9	2,6	3,4	4,7	9,1

A-V.6.7 - Cal 03- Rejeito Rougher 1– Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 03 - Rejeito Rougher 1					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
<i>i</i>	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	14,5	0,7	0,7	92,3	6,46	0,42	0,24	0,17	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	0,02
2	150	16,5	0,8	1,3	93,3	4,56	0,66	0,41	0,30	0,23	0,18	0,15	0,12	0,09	0,05
3	74	20,6	1,1	1,1	95,0	2,74	0,71	0,46	0,33	0,25	0,19	0,14	0,10	0,07	0,0
4	44	15,0	0,9	0,9	96,1	2,02	0,56	0,37	0,28	0,21	0,16	0,13	0,09	0,06	0,0
5	20	17,5	1,7	0,9	98,5	0,35	0,10	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,09	0,12	0,5
6	9	15,9	2,3	2,3	97,0	0,05	0,10	0,14	0,18	0,22	0,27	0,32	0,39	0,50	0,9

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-V.6.8 - Cal 03- Concentrado Rougher 2– Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 03 - Concentrado Rougher 2					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
<i>i</i>	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	11,4	17,5	16,1	3,30	34,7	39,0	17,1	4,91	0,98	0,13	0,01	0,00	0,00	0,00
2	150	12,5	25,5	27,2	6,8	22,6	23,9	18,6	12,88	7,99	4,36	1,99	0,69	0,14	0,01
3	74	23,8	32,6	33,5	5,2	25,5	16,6	13,2	10,8	8,9	7,1	5,5	3,9	2,4	0,9
4	44	7,9	47,8	45,2	4,4	8,9	12,6	13,6	13,4	12,6	11,2	9,5	7,3	4,7	1,7
5	20	14,6	69,6	69,2	8,7	1,8	3,2	4,2	5,1	6,1	7,2	8,6	10,6	14,0	30,5
6	9	29,9	31,7	31,8	63,7	0,0	0,0	0,1	0,3	0,8	1,7	3,1	5,4	9,0	15,9

A-V.6.9 - Cal 03- Alimentação– Planilha Consolidada de Ajuste Beta

Cal 03 - Alimentação - Soma de Produtos					Classes de liberação, de acordo com o teor mássico de calcopirita das partículas										
					0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
<i>i</i>	Tamanho partícula (μm)	% Retida	Teor de Cpy balanceado granulometria (%)	Teor Cpy calc pela dist beta (%)	Ajuste BETA - Distribuição percentual, em massas, pelas classes de liberação										
1	212	14	2,3	2,1	87,9	6,56	1,70	1,37	1,05	0,70	0,39	0,18	0,06	0,01	0,00
2	150	16,3	4,2	4,0	85,8	6,06	1,52	1,33	1,27	1,17	1,02	0,82	0,58	0,33	0,09
3	74	21,0	6,3	6,7	85,3	3,70	1,40	1,30	1,29	1,27	1,25	1,22	1,18	1,10	0,9
4	44	15,2	7,2	7,4	87,8	2,14	0,86	0,62	0,62	0,67	0,75	0,86	1,03	1,36	3,3
5	20	18,1	10,3	10,3	87,2	0,51	0,42	0,43	0,46	0,50	0,58	0,70	0,90	1,34	7,0
6	OF	15,5	5,8	5,7	93,5	0,04	0,08	0,11	0,15	0,19	0,24	0,30	0,37	0,49	4,5

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Anexo VI - Resultados de Balanço Completo

A-VI.1 - Ensaio Cal 01

A-VI.1.1 - Balanço Completo- Cal 01 – Teor médio de calcopirita de cada classe

CAL 01 - Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Tamanho (μm)	Teores mássicos médios de calcopirita calculados para cada fração										
212	0%	2,7%	19,5%	31,6%	42,8%	53,1%	62,7%	71,5%	79,7%	86,9%	94,1%
150	0%	4,6%	19,9%	32,0%	43,2%	53,6%	63,3%	72,3%	80,7%	88,5%	95,1%
74	0%	5,8%	19,8%	32,0%	43,2%	53,6%	63,2%	72,2%	80,6%	88,3%	95,7%
44	0%	6,6%	19,5%	31,3%	42,3%	52,7%	62,4%	71,5%	80,1%	88,1%	96,0%
20	0%	5,8%	20,2%	32,5%	43,8%	54,2%	63,9%	72,9%	81,3%	89,1%	97,2%
-20	0%	7,4%	20,7%	32,7%	43,9%	54,3%	63,9%	72,8%	81,2%	89,0%	97,1%

A-VI.1.2 - Balanço Completo- Cal 01 – Alimentação

Cal 01 - Balanço Completo - Alimentação														
	Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)											
	111.56	6.09	253.90											
	Recup Massa	Recup Cpy												
	100.0%	100.0%												
			Proporção em massa de cada classe por fração granulométrica											
Tamanho (um)	% Retida	Teor Calcopirita (%)	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%	Total
212	12.96	2.47	87.69	5.57	2.43	1.85	1.16	0.72	0.40	0.14	0.04	0.01	0.00	100.0
150	16.43	4.33	87.11	3.86	1.94	1.79	1.50	1.20	0.99	0.77	0.52	0.25	0.08	100.0
74	19.17	5.67	87.28	2.76	1.59	1.38	1.25	1.16	1.10	1.03	0.95	0.85	0.67	100.0
44	15.50	7.35	88.17	1.45	0.86	0.75	0.77	0.81	0.87	0.98	1.11	1.36	2.87	100.0
20	20.55	9.52	87.75	0.74	0.40	0.43	0.53	0.54	0.61	0.73	0.88	1.20	6.19	100.0
-20	15.39	5.72	93.40	0.12	0.14	0.14	0.15	0.16	0.20	0.26	0.40	0.73	4.33	100.0
Total	100.00	6.09												

A-VI.1.3 - Balanço Completo- Cal 01 – Concentrado Rougher 1

Cal 01 - Balanço Completo - Concentrado Rougher 1														
	Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)											
	11.27	51.10	35.99											
	Recup Massa	Recup Cpy												
	10.1%	84.7%												
				Proporção em massa de cada classe por fração granulométrica										
Tamanho	% Retida	Teor Calcopirita (%)	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%	Total
212	9.87	26.96	1.54	23.68	25.68	20.21	13.09	8.73	4.85	1.69	0.43	0.09	0.00	100.0
150	15.45	39.10	3.04	14.43	16.72	16.12	13.73	11.28	9.40	7.22	4.90	2.35	0.82	100.0
74	19.25	48.41	4.78	11.40	11.52	10.89	10.37	10.04	9.57	9.12	8.50	7.70	6.11	100.0
44	15.80	64.59	5.58	5.29	5.55	5.78	6.26	6.77	7.34	8.45	9.76	12.26	26.95	100.0
20	22.85	73.70	10.95	1.75	1.61	2.41	3.59	3.92	4.64	5.81	7.11	9.70	48.51	100.0
OF	16.78	35.98	60.38	0.30	0.37	0.37	0.42	0.47	0.79	1.29	2.30	4.05	29.26	100.0
Total	100.00	51.10												

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-VI.1.4 - Balanço Completo- Cal 01 – Rejeito Rougher 1

Cal 01 - Balanço Completo - Rejeito Rougher 1														
	Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)											
	100.29	1.03	217.90											
	Recup Massa	Recup Cpy												
	89.9%	15.2%												
			Proporção em massa de cada classe por fração granulométrica											
Tamanho	% Retida	Teor Calcopirita (%)	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%	Total
212	13.31	0.43	94.87	4.06	0.49	0.32	0.17	0.05	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	100.0
150	16.54	0.68	95.93	2.75	0.38	0.28	0.22	0.14	0.11	0.09	0.06	0.03	0.01	100.0
74	19.16	0.84	96.59	1.78	0.47	0.31	0.22	0.16	0.14	0.11	0.10	0.08	0.05	100.0
44	15.47	0.77	97.64	1.01	0.32	0.17	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.11	0.11	100.0
20	20.29	1.39	97.47	0.61	0.25	0.18	0.14	0.11	0.10	0.09	0.09	0.13	0.83	100.0
OF	15.23	1.97	97.48	0.09	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.14	0.16	0.31	1.24	100.0
Total	100.00	1.03												

A-VI.1.5 - Balanço Completo- Cal 01 – Concentrado Rougher 2

Cal 01 - Balanço Completo - Concentrado Rougher 2														
	Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)											
	1.35	49.53	9.38											
	Recup Massa	Recup Cpy												
	1.2%	9.9%												
				Proporção em massa de cada classe por fração granulométrica										
Tamanho	% Retida	Teor Calcopirita (%)	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%	Total
212	6.62	20.87	2.77	28.07	32.54	21.83	10.29	3.90	0.57	0.04	0.00	0.00	0.00	100.0
150	12.90	40.81	3.24	12.61	16.04	15.40	14.08	11.34	9.71	8.50	5.67	2.70	0.73	100.0
74	19.44	44.04	3.50	12.76	14.78	13.84	11.94	10.15	9.23	7.76	6.79	5.54	3.70	100.0
44	11.82	58.26	3.68	4.53	7.46	8.19	9.46	10.76	11.54	11.72	11.32	10.92	10.42	100.0
20	18.98	83.99	4.01	1.18	1.54	2.03	2.35	2.57	3.07	3.54	4.84	9.19	65.68	100.0
OF	30.23	38.03	58.99	0.33	0.25	0.10	0.15	0.32	0.40	0.70	1.41	5.94	31.41	100.0
Total	100.00	49.53												

A-VI.1.6 - Balanço Completo- Cal 01 – Rejeito Rougher 2

Cal 01 - Balanço Completo - Rejeito Rougher 2														
	Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)											
	98.94	0.37	208.50											
	Recup Massa	Recup Cpy												
	88.7%	5.4%												
Proporção em massa de cada classe por fração granulométrica														
Tamanho	% Retida	Teor Calcopirita (%)	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%	Total
212	13.40	0.29	95.49	3.90	0.27	0.18	0.10	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	100.0
150	16.59	0.25	96.92	2.64	0.22	0.12	0.07	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
74	19.16	0.24	97.88	1.63	0.27	0.12	0.06	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	100.0
44	15.52	0.18	98.62	0.97	0.24	0.09	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
20	20.31	0.33	98.67	0.61	0.23	0.16	0.11	0.08	0.06	0.04	0.03	0.01	0.00	100.0
OF	15.02	0.98	98.54	0.09	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.16	0.41	100.0
Total	100.00	0.37												

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-VI.1.7 - Balanço Completo- Cal 01 – Concentrado Scavenger

Cal 01 - Balanço Completo - Concentrado Scavenger														
	Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)											
	4.51	4.37	60.26											
	Recup Massa	Recup Cpy												
	4.0%	2.9%												
				Proporção em massa de cada classe por fração granulométrica										
Tamanho	% Retida	Teor Calcopirita (%)	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%	Total
212	9.32	2.31	31.79	65.63	2.27	0.28	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
150	3.51	10.24	31.53	39.24	16.06	7.13	3.38	1.90	0.75	0.01	0.00	0.00	0.00	100.0
74	4.52	11.74	38.95	28.97	15.51	8.35	4.03	2.15	1.11	0.54	0.31	0.06	0.02	100.0
44	3.90	7.68	64.37	15.28	8.46	5.50	3.09	1.71	0.92	0.41	0.19	0.04	0.02	100.0
20	19.24	4.90	84.20	4.97	2.85	2.42	1.81	1.27	1.13	0.76	0.45	0.12	0.02	100.0
OF	59.51	3.40	95.37	0.22	0.27	0.25	0.25	0.29	0.27	0.28	0.36	0.54	1.90	100.0
Total	100.00	4.37												

A-VI.1.8 - Balanço Completo- Cal 01 – Rejeito Scavenger

Cal 01 - Balanço Completo - Rejeito Scavenger														
	Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)											
	94.43	0.18	148.30											
	Recup Massa	Recup Cpy												
	84.6%	2.5%												
				Proporção em massa de cada classe por fração granulométrica										
Tamanho	% Retida	Teor Calcopirita (%)	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%	Total
212	13.60	0.22	97.58	1.88	0.20	0.17	0.10	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	100.0
150	17.21	0.15	97.56	2.29	0.06	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
74	19.86	0.12	98.52	1.33	0.10	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
44	16.07	0.09	99.02	0.81	0.15	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
20	20.36	0.13	99.32	0.41	0.11	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	100.0
OF	12.90	0.45	99.24	0.06	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	100.0
Total	100.00	0.18												

A-VI.1.9 - Balanço Completo- Cal 01 – Concentrado Cleaner

Cal 01 - Balanço Completo - Concentrado Cleaner															0.003
	Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)												
	10.75	55.26	29.72												
	Recup Massa	Recup Cpy													
	9.6%	87.4%													
			Proporção em massa de cada classe por fração granulométrica												
Tamanho	% Retida	Teor Calcopirita (%)	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%	Total	
212	10.21	27.13	1.35	23.58	25.71	20.15	13.05	8.99	4.95	1.70	0.43	0.08	0.00	100.0	
150	16.24	40.24	2.81	13.15	16.34	16.14	14.00	11.56	9.76	7.66	5.22	2.51	0.87	100.0	
74	20.47	49.13	4.60	10.92	11.34	10.83	10.32	10.01	9.65	9.24	8.72	8.00	6.38	100.0	
44	16.88	65.20	5.46	4.97	5.32	5.57	6.16	6.79	7.47	8.64	9.98	12.53	27.11	100.0	
20	23.06	78.91	7.51	1.29	1.26	1.98	3.00	3.39	4.05	5.28	6.83	9.93	55.47	100.0	
OF	13.14	50.95	45.84	0.00	0.01	0.03	0.11	0.23	0.62	1.31	2.71	6.07	43.07	100.0	
Total	100.00	55.26													

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-VI.1.10 - Balanço Completo- Cal 01 – Rejeito Cleaner

Cal 01 - Balanço Completo - Rejeito Cleaner														
	Dados Balanceados													
	Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)											
	1.87	26.12	15.65											
	Recup Massa	Recup Cpy												
	1.7%	7.2%												
			Proporção em massa de cada classe por fração granulométrica											
Tamanho	% Retida	Teor Calcopirita (%)	0	0,1- 15%	15- 25%	25- 35%	35- 45%	45- 55%	55- 65%	65- 75%	75- 85%	85- 95%	95- 100%	Total
212	5.59	19.92	4.66	28.54	31.26	22.22	11.05	1.86	0.14	0.24	0.04	0.01	0.00	100.0
150	9.09	29.14	5.66	25.99	20.00	14.90	11.31	8.44	6.03	4.02	2.37	1.08	0.22	100.0
74	12.39	36.66	4.96	17.56	16.98	14.87	12.62	10.46	8.45	6.46	4.41	2.42	0.80	100.0
44	6.70	47.71	4.91	8.90	11.26	11.87	11.89	11.53	10.86	9.88	8.55	6.70	3.66	100.0
20	18.87	44.61	30.03	4.62	3.99	5.21	6.83	6.63	7.61	7.82	7.44	7.66	12.16	100.0
OF	47.35	13.09	82.90	0.79	0.89	0.78	0.80	0.78	0.87	0.98	1.23	1.72	8.24	100.0
Total	100.0	26.12												

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-VI.2 - Ensaio Cal 02

A-VI.2.1 - Balanço Completo- Cal 02 – Teor médio de calcopirita de cada classe

Tamanho (μm) ↓	Cal 02 - Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Teores mássicos médios de calcopirita calculados para cada fração a partir do ajuste beta											
212	0%	3,0%	19,4%	31,4%	42,5%	52,8%	62,4%	71,2%	79,9%	87,1%	94,3%
150	0%	6,0%	19,9%	32,0%	43,2%	53,6%	63,3%	72,3%	80,7%	88,5%	95,1%
74	0%	6,3%	20,0%	32,1%	43,3%	53,7%	63,4%	72,3%	80,7%	88,4%	95,1%
44	0%	6,6%	20,2%	32,3%	43,5%	53,9%	63,6%	72,6%	81,0%	88,9%	96,4%
20	0%	6,6%	20,6%	32,9%	44,2%	54,6%	64,2%	73,2%	81,5%	89,3%	97,4%
OF	0%	6,6%	20,6%	32,9%	44,2%	54,6%	64,2%	73,2%	81,5%	89,3%	97,4%

A-VI.2.2 - Balanço Completo- Cal 02 – Alimentação

Cal 02 - Alimentação		
Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)
116,5	6,2	248,7
Recup Massa (%)	Recup Cpy (%)	
100,0%	100,0%	

Classe de liberação j											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	

i	Tamanho (μm)	% Retida	Teor de Calcopirita (%)	Distribuição % em massa por classe de liberação										
1	212	13,9	1,91	88,9	6,0	2,00	1,21	0,82	0,53	0,33	0,13	0,03	0,01	0,00
2	150	16,6	4,38	87,5	3,6	1,89	1,65	1,50	1,20	0,99	0,79	0,53	0,30	0,09
3	74	23,1	6,31	87,3	1,8	1,40	1,39	1,38	1,35	1,33	1,23	1,11	0,97	0,71
4	44	14,0	7,36	89,0	1,2	0,58	0,56	0,61	0,66	0,74	0,86	1,03	1,36	3,35
5	20	17,1	10,60	86,7	0,6	0,44	0,41	0,46	0,55	0,65	0,81	1,07	1,62	6,68
6	OF	15,3	5,76	93,3	0,1	0,11	0,13	0,18	0,23	0,25	0,29	0,39	0,62	4,36
	Total	100,0	6,2											

A-VI.2.3 - Balanço Completo- Cal 02 – Rejeito Rougher

Cal 02 - Rejeito Rougher1		
Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)
106,4	1,2	230,2
Recup Massa	Recup Calcopirita	
91,3%	18,0%	

Classe de liberação j											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	

i	Tamanho (um)	% Retida	Calcopirita	Distribuição % em massa por classe de liberação										
1	212	14,5	0,54	93,40	5,27	0,77	0,26	0,14	0,09	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00
2	150	16,6	0,80	95,70	2,57	0,62	0,36	0,30	0,17	0,13	0,07	0,04	0,02	0,01
3	74	22,9	1,04	96,43	1,48	0,59	0,34	0,29	0,25	0,22	0,17	0,11	0,07	0,05
4	44	14,0	1,08	97,10	1,15	0,34	0,23	0,19	0,17	0,14	0,14	0,13	0,14	0,27
5	20	16,7	1,96	96,81	0,57	0,32	0,19	0,14	0,13	0,13	0,13	0,18	0,28	1,12
6	OF	15,4	1,86	97,48	0,11	0,12	0,13	0,17	0,20	0,18	0,16	0,17	0,17	1,12
	Total	100,0	1,2											

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-VI.2.4 - Balanço Completo- Cal 02 – Concentrado Rougher 1

Cal 02 - Concentrado Rougher 1		
Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)
10,1	58,4	18,4
Recup Massa	Recup Calcopirita	
8,7%	82,0%	

				Classe de liberação j										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
				0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
i	Tamanho (um)	% Retida	Calcopirita	Distribuição % em massa por classe de liberação										
1	212	7,7	28,74	0,9	20,7	26,23	19,82	14,17	9,17	5,85	2,33	0,66	0,13	0,00
2	150	16,8	41,57	2,2	14,0	15,01	14,99	13,92	11,93	9,96	8,20	5,63	3,23	0,96
3	74	25,5	56,16	1,3	5,0	9,07	11,32	11,62	11,72	11,79	11,21	10,54	9,44	7,00
4	44	14,1	72,96	4,9	2,0	3,14	4,01	4,90	5,81	7,00	8,38	10,39	14,02	35,51
5	20	21,1	82,68	2,8	0,6	1,43	2,24	3,12	4,01	5,04	6,41	8,49	12,87	53,02
6	10,00	14,7	48,63	47,9	0,0	0,03	0,11	0,26	0,54	1,02	1,78	2,90	5,58	39,89
	Total	100,0	58,4											

A-VI.2.5 - Balanço Completo- Cal 02 – Concentrado Rougher 2

Cal 02 - Concentrado Rougher 2		
Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)
2,3	39,4	16,3
Recup Massa	Recup Cpy	
1,9%	12,4%	

				Classe de liberação j										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
				0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
i	Tamanho (um)	% Retida	Calcopirita	Distribuição % em massa por classe de liberação										
1	212	8,3	22,55	1,0	33,1	27,37	17,30	10,10	6,07	3,76	1,15	0,18	0,03	0,00
2	150	11,6	35,55	1,1	15,2	20,17	20,40	17,75	9,70	7,21	4,09	2,55	1,41	0,41
3	74	18,9	45,83	1,7	8,2	15,65	14,99	13,75	12,60	11,49	9,11	5,98	3,95	2,59
4	44	9,7	57,69	2,7	8,6	9,44	9,37	8,96	8,92	8,09	8,18	8,37	9,38	17,93
5	20	17,7	68,03	26,2	0,0	0,02	0,02	0,03	0,73	2,02	3,82	6,43	11,37	49,38
6	OF	33,8	20,84	77,4	0,1	0,10	0,24	0,28	0,63	0,60	0,52	0,57	0,63	18,96
	Total/		39,4											

A-VI.2.6 - Balanço Completo- Cal 02 – Rejeito Rougher 2

Cal 02 - Rejeito Rougher 2		
Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)
104,1	0,4	213,9
Recup Massa	Recup Cpy	
89,4%	5,6%	

				Classe de liberação j											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
				Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
				0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
i	Tamanho (um)	% Retida	Calcopirita	Distribuição % em massa por classe de liberação											
1	212	14,6	0,27	94,5	4,9	0,44	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
2	150	16,7	0,28	97,1	2,4	0,33	0,06	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	
3	74	23,0	0,25	98,1	1,4	0,32	0,08	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	
4	44	14,1	0,22	98,5	1,0	0,20	0,09	0,06	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	
5	20	16,7	0,44	98,4	0,6	0,32	0,20	0,15	0,12	0,08	0,05	0,03	0,02	0,01	
6	OF	15,0	0,93	98,5	0,1	0,12	0,13	0,16	0,18	0,15	0,14	0,15	0,15	0,24	
	Total	100,0	0,4												

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-VI.2.7 - Balanço Completo- Cal 02 – Concentrado Scavenger

Cal 02 - Concentrado Scavenger		
Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)
2,1	9,2	39,3
Recup Massa	Recup Cpy	
1,8%	2,7%	

i	Tamanho (um)	% Retida	Calcopirita
1	212	4,4	3,58
2	150	3,9	18,52
3	74	5,7	24,55
4	44	3,7	23,36
5	20	16,1	12,85
6	3,00	66,3	6,07
Total		100,0	9,2

Classe de liberação j										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Distribuição % em massa por classe de liberação										
14,1	79,9	5,50	0,47	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18,8	34,4	17,84	11,90	7,50	4,03	3,62	1,70	0,18	0,03	0,01
16,0	22,2	22,13	13,49	10,45	6,89	4,77	2,63	1,15	0,34	0,03
29,3	17,6	14,10	12,36	9,60	6,45	4,34	2,93	1,61	1,05	0,59
61,2	11,5	7,06	5,57	4,53	3,69	2,82	1,62	1,12	0,72	0,25
89,9	0,5	0,85	0,98	1,28	1,37	1,02	1,10	0,80	0,79	1,46

5

A-VI.2.8 - Balanço Completo- Cal 02 – Rejeito Scavenger

Cal 02 - Rejeito Scavenger		
Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)
102,1	0,2	174,6
Recup Massa	Recup Cpy	
87,6%	2,9%	

i	Tamanho (um)	% Retida	Calcopirita
1	212	14,8	0,25
2	150	17,0	0,20
3	74	23,3	0,13
4	44	14,3	0,10
5	20	16,7	0,19
6	OF	13,9	0,43
Total		100,0	0,2

Classe de liberação j										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Distribuição % em massa por classe de liberação										
95,0	4,5	0,41	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
97,5	2,2	0,25	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
98,5	1,3	0,21	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
98,8	1,0	0,13	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
99,2	0,4	0,19	0,09	0,06	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00
99,3	0,1	0,05	0,04	0,06	0,06	0,07	0,05	0,08	0,09	0,12

A-VI.2.9 - Balanço Completo- Cal 02 – Concentrado Cleaner

Cal 02 - Concentrado Cleaner		
Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)
9,4	61,6	11,3
Recup Massa	Recup Cpy	
8,0%	80,3%	

i	Tamanho (um)	% Retida	Calcopirita
1	212	8,1	28,22
2	150	17,8	41,18
3	74	26,4	55,07
4	44	14,2	72,98
5	20	22,6	89,90
6	3,00	10,9	62,39
Total		100,0	61,6

Classe de liberação j										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Distribuição % em massa por classe de liberação										
3,5	2,8	3,76	4,44	5,11	5,87	6,80	8,04	9,92	13,50	36,33
0,1	0,0	0,09	0,57	1,39	2,36	3,79	5,70	8,78	14,72	62,46

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-VI.2.10 - Balanço Completo- Cal 02 – Rejeito Cleaner

Cal 02 - Rejeito Cleaner			
Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)	
3,0	34,0	23,4	
Recup Massa	Recup Cpy		
2,6%	14,1%		

Classe de liberação j											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
Distribuição % em massa por classe de liberação											

i	Tamanho (um)	% Retida	Calcopirita											
1	212	7,0	25,04	0,00										
2	150	10,0	38,47	0,00										
3	74	17,5	52,87	0,00										
4	44	10,6	62,25	62,25	9,3	3,3	4,92	5,95	6,84	7,70	8,62	9,67	10,93	12,97
5	20	13,8	31,25	31,25	39,3	2,8	6,96	8,70	9,01	9,35	8,53	7,52	5,03	1,91
6	9	41,2	20,08	0,00										
	Total	100,0	34,0											

A-VI.3 - Ensaio Cal 03 – Balanço Completo

A-VI.3.1 - Balanço Completo- Cal 03 – Teor médio de calcopirita de cada classe

CAL 03 - Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Tamanho (μm)	Teores mássicos médios de calcopirita calculados para cada fração a partir do ajuste beta										
212	0,0%	3,0%	19,4%	31,4%	42,5%	52,8%	62,4%	71,2%	79,9%	87,1%	94,3%
150	0,0%	6,9%	20,2%	32,3%	43,5%	53,9%	63,5%	72,5%	80,8%	88,5%	95,5%
74	0,0%	6,7%	20,2%	32,4%	43,6%	54,0%	63,6%	72,5%	80,8%	88,5%	95,2%
44	0,0%	6,1%	19,4%	31,4%	42,5%	52,9%	62,6%	71,7%	80,2%	88,3%	96,9%
20	0,0%	7,1%	20,0%	32,0%	43,2%	53,5%	63,2%	72,3%	80,8%	88,9%	97,5%
-20	0,0%	9,0%	20,6%	31,9%	42,6%	52,8%	62,4%	71,5%	80,1%	88,3%	96,5%

A-VI.3.2 - Balanço Completo- Cal 03 – Alimentação

Alimentação			
Vazão Massas (g/min)	Teor calcopirita (%)	Vazão de água (g/min)	
112,0	6,2	246,8	
Recup Massa (%)	Recup Cpy (%)		
100,0%	100,0%		

Classe de liberação j											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
Distribuição % em massa por classe de liberação em cada fração granulométrica											

i	Tamanho (μm)	% Retida	Teor Cpy (%)											
1	212	14,0	2,28	83,8	10,9	1,6	1,3	1,1	0,7	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0
2	150	16,3	4,15	88,4	3,67	1,4	1,3	1,3	1,2	1,0	0,8	0,5	0,3	0,1
3	74	21,0	6,28	86,8	2,02	1,7	1,6	1,5	1,5	1,3	1,2	1,0	0,8	0,6
4	44	15,1	7,21	88,7	1,61	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	1,2	3,4
5	20	18,0	10,29	87,4	0,48	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9	1,3	7,2
6	<20	15,5	5,80	93,3	0,03	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	4,7
	Total	100,0	6,2											

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-VI.3.3 - Balanço Completo- Cal 03 – Rejeito Rougher 1

Cal 03 - Rejeito Rougher 1		
Vazão Massas (g/min)	Teor calcopirita (%)	Vazão de água (g/min)
103,416	1,3	234,9
Recup Massa (%)	Recup Cpy (%)	
92,3%	18,8%	

			Classe de liberação j										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
			0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Tamanho (µm)	% Retida	Teor Cpy (%)	Distribuição % em massa por classe de liberação										
212	14,5	0,71	87,5	11,2	0,82	0,27	0,14	0,07	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00
150	16,5	0,80	94,7	3,6	0,84	0,43	0,23	0,12	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01
74	20,6	1,11	95,7	1,7	1,01	0,55	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,03
44	15,0	0,87	96,9	1,5	0,44	0,27	0,21	0,19	0,17	0,15	0,13	0,08	0,04
20	17,5	1,72	97,0	0,4	0,28	0,23	0,20	0,20	0,21	0,23	0,26	0,36	0,55
<20	15,9	2,27	96,9	0,0	0,06	0,12	0,22	0,32	0,35	0,29	0,28	0,42	0,97
Total	100,0	1,3											

A-VI.3.4 - Balanço Completo- Cal 03 – Concentrado Rougher 1

Cal 03 - Concentrado Rougher 1		
Vazão Massas (g/min)	Teor calcopirita (%)	Vazão de água (g/min)
8,6	65,3	11,9
Recup Massa (%)	Recup Cpy (%)	
7,7%	81,2%	

			Classe de liberação j										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
			0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
i	Tamanho	% Retida	Teor Cpy (%)	Distribuição % em massa por classe de liberação									
1	212	7,63	38,5	0,65	3,41	18,44	25,24	23,22	16,07	9,07	3,04	0,78	0,09
2	150	14,22	50,98	0,85	4,82	9,28	13,83	15,88	16,04	14,48	11,84	8,01	3,65
3	74	26,21	55,24	2,40	4,70	8,38	11,20	12,60	12,80	12,19	11,38	10,02	8,34
4	44	17,19	73,7	2,86	3,08	3,79	4,29	4,87	5,53	6,38	7,56	9,42	12,98
5	20	24,37	84,58	4,05	0,76	1,20	1,61	2,06	2,56	3,32	4,46	5,97	9,16
6	<20	10,38	70,9	26,31	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,17
Total		100,0	65,3										

A-VI.3.5 - Balanço Completo- Cal 03 – Concentrado Rougher 2

Cal 03 - Concentrado Rougher 2		
Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Vazão de água (g/min)
2,4	36,3	16,9
Recup Massa (%)	Recup Cpy (%)	
2,2%	12,7%	

			Classe de liberação j										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
			0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
i	Tamanho (um)	% Retida	Teor Cpy (%)	Distribuição % em massa por classe de liberação									
1	212	11,4	17,46	4,18	40,06	30,27	12,64	6,71	3,62	1,78	0,56	0,15	0,02
2	150	12,5	25,52	4,04	27,88	27,67	17,50	10,74	5,92	2,93	1,65	0,86	0,54
3	74	23,8	32,61	4,89	20,07	22,16	16,64	11,57	8,79	6,47	4,38	2,50	1,47
4	44	7,9	47,82	6,86	8,56	9,87	10,91	11,24	11,52	11,40	10,57	9,39	6,42
5	20	14,5	69,61	6,85	4,22	3,50	3,44	3,96	5,10	6,86	8,98	11,47	17,51
6	<20	29,9	31,69	63,269	0,03	0,10	0,24	0,48	1,01	1,98	2,71	4,52	8,73
		100,00	36,30										

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-VI.3.6 - Balanço Completo- Cal 03 – Rejeito Rougher 2

Cal 03 - Rejeito Rougher 2														
	Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)											
	101,0	0,4	218,0											
	Recup Massa (%)	Recup Cpy (%)		Classe de liberação j										
	90,2%	6,1%		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
				0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
i	Tamanho (um)	% Retida	Teor Cpy (%)	Distribuição % em massa por classe de liberação										
1	212	14,60	0,39	89,0	10,7	0,27	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	150	16,57	0,36	96,3	3,15	0,36	0,12	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	74	20,52	0,23	98,2	1,23	0,42	0,10	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
4	44	15,15	0,29	98,0	1,39	0,32	0,14	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00
5	20	17,60	0,37	98,8	0,37	0,21	0,16	0,13	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02	0,01
6	<20	15,57	0,92	98,5	0,03	0,06	0,12	0,21	0,29	0,27	0,18	0,09	0,04	0,24
		100,01	0,4											

A-VI.3.7 - Balanço Completo- Cal 03 – Concentrado Scavenger

Cal 03 - Concentrado Scavenger														
	Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)											
	2,9	6,6	49,0											
	Recup Massa (%)	Recup Cpy (%)		Classe de liberação j										
	2,6%	2,8%		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
				0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
i	Tamanho (um)	% Retida	Calcopirita	Distribuição % em massa por classe de liberação										
1	212	5,42	4,47	11,9	80,9	4,0	1,5	1,1	0,419	0,140	0,04	0,01	0,00	0,0
2	150	3,15	17,98	12,3	34,2	27,7	15,2	6,9	2,7	0,76	0,18	0,04	0,02	0,03
3	74	2,54	19,64	21,9	25,6	21,8	13,3	8,2	4,78	2,57	1,17	0,48	0,11	0,10
4	44	6,71	13,50	46,5	20,0	12,8	7,2	4,9	3,4	2,31	1,47	0,84	0,42	0,09
5	20	16,46	9,12	76,6	4,74	3,99	3,45	2,97	2,50	2,05	1,60	1,16	0,71	0,25
6	<20	65,73	4,45	93,5	0,10	0,21	0,38	0,71	0,82	0,88	0,63	0,49	0,32	1,93
		100,0	6,6											

A-VI.3.8 - Balanço Completo- Cal 03 – Rejeito Scavenger

Cal 03 - Rejeito Scavenger														
	Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)											
	98,1	0,2	169,0											
	Recup Massa (%)	Recup Cpy (%)		Classe de liberação j										
	87,6%	3,3%		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
				0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
i	Tamanho (um)	% Retida	Calcopirita	Distribuição % em massa por classe de liberação										
1	212	14,9	0,35	89,8	9,89	0,23	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	150	17,0	0,26	96,8	2,97	0,21	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	74	21,1	0,17	98,5	1,14	0,34	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	44	15,4	0,12	98,6	1,14	0,16	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	20	17,6	0,13	99,4	0,25	0,11	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
6	<20	14,1	0,43	99,2	0,02	0,04	0,08	0,14	0,21	0,19	0,11	0,03	0,00	0,00
		100,0	0,2											

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-VI.3.9 - Balanço Completo- Cal 03 – Concentrado Cleaner

Cal 03 - Concentrado Cleaner		
Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)
9,5	62,9	15,5
Recup Massa (%)	Recup Cpy (%)	
8,5%	86,7%	

Classe de liberação j											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	

i	Tamanho (um)	% Retida	Calcopirita	Distribuição % em massa por classe de liberação										
1	212	8,8	33,21	1,36	13,2	21,2	21,6	19,0	13,0	7,38	2,48	0,64	0,08	0,00
2	150	14,4	47,69	0,99	7,8	12,1	14,4	15,2	14,5	12,9	10,5	7,15	3,29	1,23
3	74	27,4	51,73	2,63	7,4	10,7	12,0	12,2	12,0	11,2	10,3	8,90	7,36	5,36
4	44	16,4	71,83	2,89	3,38	4,28	4,90	5,48	6,12	6,90	7,88	9,44	12,3	36,37
5	20	22,5	86,13	2,93	0,64	0,96	1,31	1,81	2,38	3,34	4,68	6,43	10,3	65,23
6	<20	10,5	73,89	22,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,16	1,51	4,88	70,73
		100,0	62,9											

A-VI.3.10 - Balanço Completo- Cal 03 – Rejeito Cleaner

Cal 03 - Rejeito Cleaner		
Fluxo de Massa (g/min)	Teor Calcopirita (%)	Fluxo de água (g/min)
1,5	33,36	13,35
Recup Massa	Recup Cpy	
1,3%	7,1%	

Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita													
0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%			

i	Tamanho (um)	% Retida	Calcopirita	Distribuição % em massa por classe de liberação										
1	212	6,5	23,82	4,2	24,5	27,9	20,8	12,2	6,7	2,73	0,78	0,18	0,01	0,00
2	150	10,1	29,62	6,1	23,7	21,0	15,83	12,03	9,9	5,77	3,41	1,48	0,72	0,09
3	74	14,6	37,29	6,3	13,4	16,9	16,5	14,4	11,7	8,64	6,28	3,60	1,82	0,49
4	44	7,3	55,27	9,6	8,2	7,4	7,1	7,3	7,6	7,83	8,28	9,07	10,56	17,11
5	20	20,15	55,63	15,5	5,69	5,63	5,87	6,12	6,89	7,36	8,22	9,19	10,90	18,64
6	<20	41,4	19,70	75,83	0,08	0,19	0,37	0,63	1,26	2,41	3,03	2,98	2,57	10,65
		100,0	33,36											

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

Anexo VII - Resultados dos cálculos de superfície de calcopirita

Conforme explicado no Capítulo 9 da tese, a área superficial das partículas de cada classe j pode ser estimada a partir da equação 9.5, onde f_{mj}^{***} é a proporção em massa de cada classe liberação j , ρ_j é a densidade de cada classe, ms_i^{***} é a percentagem retida no tamanho correspondente à classe, d é o diâmetro da partícula, M_{gl}^{***} é a vazão global do fluxo.

$$sup_{mrl i,j} = \frac{f_{mj}^{***} \cdot ms_i^{***}}{\rho_j} \cdot \frac{6}{d_i} \cdot \bar{g}_{mj}^{***} \cdot M_{alim gl}^{***}$$

A-VII.1 - Ensaio Cal 01 – Superfícies

A-VII.1.1 - Ensaio Cal 01- Superfície Alimentação

	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
	Teor Médio da Classe										
	0,0%	5,5%	19,9%	32,0%	43,2%	53,6%	63,2%	72,2%	80,6%	88,3%	95,9%
Tamanho (um)	Cal 01 - Alimentação - Área superficial de calcopirita (cm²/s)										
212		0,07	0,10	0,12	0,10	0,07	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00
150		0,08	0,14	0,20	0,22	0,21	0,20	0,17	0,13	0,07	0,02
74		0,14	0,28	0,37	0,44	0,49	0,53	0,55	0,55	0,53	0,43
44		0,10	0,20	0,28	0,37	0,47	0,57	0,72	0,88	1,15	2,54
20		0,15	0,28	0,47	0,74	0,90	1,17	1,55	2,02	2,95	15,94
OF		0,03	0,14	0,22	0,31	0,40	0,57	0,84	1,38	2,67	16,70

A-VII.1.2 - Ensaio Cal 01 - Distribuição % da recuperação de calcopirita no Rougher 1 por classe de liberação e por fração granulométrica em relação à alimentação

	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
	Teor Médio da Classe											
	0,0%	5,5%	19,9%	32,0%	43,2%	53,6%	63,2%	72,2%	80,6%	88,3%	95,9%	
Tamanho (um)	Cal 01 - Concentrado Rougher - Distribuição % da recuperação de calcopirita por classe de liberação e por fração granulométrica em relação à alimentação											
212	0,00%	0,10%	0,82%	1,05%	0,92%	0,76%	0,50%	0,20%	0,06%	0,01%	0,00%	4,4%
150	0,00%	0,17%	0,85%	1,32%	1,52%	1,55%	1,52%	1,34%	1,01%	0,53%	0,20%	10,0%
74	0,00%	0,21%	0,73%	1,11%	1,43%	1,72%	1,93%	2,10%	2,18%	2,17%	1,87%	15,5%
44	0,00%	0,09%	0,28%	0,47%	0,69%	0,93%	1,20%	1,58%	2,05%	2,83%	6,78%	16,9%
20	0,00%	0,04%	0,12%	0,30%	0,60%	0,81%	1,12%	1,60%	2,19%	3,28%	17,87%	27,9%
10	0,00%	0,0%	0,02%	0,03%	0,05%	0,07%	0,14%	0,26%	0,52%	1,00%	7,90%	10,0%
Total		1,72%	3,83%	5,35%	6,26%	6,81%	7,41%	8,12%	9,21%	11,44%	39,86%	84,7%

A-VII.1.3 - Ensaio Cal 01 – Razão entre a recuperação de calcopirita por classe de liberação e área superficial de calcopirita na alimentação

	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Tamanho (um)	Cal 03 - Rougher 1 - Razão entre recuperação de calcopirita por classe de liberação e área superficial de calcopirita na alimentação										
212		1,60	8,21	8,83	9,45	10,60	10,96	11,25	11,54	12,30	12,88
150		2,08	5,95	6,46	6,78	7,21	7,49	7,68	7,93	8,18	8,57
74		1,55	2,62	2,97	3,24	3,48	3,64	3,82	3,96	4,13	4,32
44		0,94	1,39	1,72	1,89	1,99	2,09	2,21	2,33	2,47	2,67
20		0,26	0,44	0,64	0,80	0,89	0,96	1,03	1,08	1,11	1,12
OF		0,18	0,15	0,15	0,17	0,18	0,25	0,31	0,38	0,38	0,47

A-VII.2 - Ensaio Cal 02 – Superfícies

A-VII.2.1 - Ensaio Cal 02- Superfície Alimentação

Tamanho (um)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
	Teor Médio da Classe										
	0,0%	5,5%	19,9%	32,0%	43,2%	53,6%	63,2%	72,2%	80,6%	88,3%	95,9%
Cal 02 - Alimentação - Área superficial de calcopirita (cm²/s)											
212		0,08	0,09	0,09	0,08	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00
150		0,08	0,15	0,20	0,24	0,23	0,21	0,19	0,14	0,08	0,03
74		0,11	0,31	0,47	0,61	0,72	0,81	0,83	0,81	0,75	0,58
44		0,08	0,13	0,19	0,27	0,36	0,46	0,59	0,77	1,08	2,79
20		0,10	0,26	0,39	0,56	0,80	1,09	1,49	2,14	3,46	14,94
10		0,03	0,12	0,22	0,39	0,59	0,74	0,97	1,41	2,36	17,45

A-VII.2.2 - Ensaio Cal 02 - Distribuição % da recuperação de calcopirita por classe de liberação e por fração granulométrica em relação à alimentação

	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%	
	Teor Médio da Classe											
	0,0%	5,5%	19,9%	32,0%	43,2%	53,6%	63,2%	72,2%	80,6%	88,3%	95,9%	
Tamanho (um)	Cal 02 - Concentrado Rougher - Distribuição % da recuperação de calcopirita por classe de liberação e por fração granulométrica em relação à alimentação											
212	0,00%	0,07%	0,55%	0,68%	0,66%	0,53%	0,40%	0,18%	0,06%	0,01%	0,00%	3,1%
150	0,00%	0,20%	0,71%	1,13%	1,42%	1,51%	1,49%	1,40%	1,07%	0,67%	0,22%	9,8%
74	0,00%	0,11%	0,65%	1,30%	1,80%	2,25%	2,67%	2,90%	3,04%	2,98%	2,38%	20,1%
44	0,00%	0,03%	0,13%	0,26%	0,42%	0,62%	0,88%	1,21%	1,67%	2,47%	6,78%	14,5%
20	0,00%	0,01%	0,09%	0,22%	0,41%	0,65%	0,96%	1,39%	2,05%	3,41%	15,31%	24,5%
10	0,00%	0,0%	0,00%	0,01%	0,02%	0,06%	0,13%	0,27%	0,49%	1,03%	8,03%	10,0%
		0,4%	2,1%	3,6%	4,7%	5,6%	6,5%	7,3%	8,4%	10,6%	32,7%	82,0%

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

A-VII.2.3 - Ensaio Cal 02 – Razão entre a recuperação de calcopirita por classe de liberação e área superficial de calcopirita na alimentação

Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
	0,0%	5,5%	19,9%	32,0%	43,2%	53,6%	63,2%	72,2%	80,6%	88,3%	95,9%
Tamanho (um)	Cal 02 - Concentrado Rougher - Razão entre recuperação de calcopirita por classe de liberação e área superficial de calcopirita na alimentação										
212		0,84	6,00	7,85	8,56	8,95	9,27	9,86	10,85	11,18	11,54
150		2,48	4,80	5,68	6,00	6,65	6,93	7,44	7,80	8,06	8,27
74		0,99	2,11	2,75	2,94	3,12	3,29	3,50	3,75	3,96	4,10
44		0,33	0,96	1,33	1,54	1,73	1,91	2,04	2,17	2,29	2,43
20		0,12	0,33	0,57	0,72	0,81	0,88	0,93	0,96	0,98	1,02
10		0,00	0,01	0,03	0,06	0,10	0,18	0,28	0,35	0,44	0,46

A-VII.3 - Ensaio Cal 03 – Superfícies

A-VII.3.1 - Ensaio Cal 03 - Densidade Média das Classes de Liberação

Classe j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Teor Cpy	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Teor Cpy médio	0,0%	5,5%	19,9%	32,0%	43,2%	53,6%	63,2%	72,2%	80,6%	88,3%	95,9%
Densidade (g/cm³)	3,12	3,18	3,30	3,41	3,53	3,65	3,77	3,89	4,01	4,13	4,27

A-VII.3.2 - Ensaio Cal 03- Superfície Alimentação

Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Teor Médio da Classe											
	0,0%	5,5%	19,9%	32,0%	43,2%	53,6%	63,2%	72,2%	80,6%	88,3%	95,9%
Tamanho (um)	CAL 03 - Área superficial de calcopirita (cm²/s) - Alimentação										
212		0,14	0,07	0,09	0,10	0,08	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00
150		0,08	0,10	0,15	0,19	0,21	0,21	0,19	0,13	0,07	0,03
74		0,11	0,33	0,47	0,60	0,68	0,71	0,71	0,65	0,57	0,42
44		0,11	0,17	0,22	0,28	0,36	0,45	0,56	0,72	0,99	3,02
20		0,08	0,23	0,35	0,49	0,65	0,90	1,25	1,74	2,77	16,63
10		0,01	0,07	0,19	0,44	0,76	0,96	0,88	0,94	1,52	18,32

A-VII.3.3 - Ensaio Cal 03 - Distribuição % da recuperação de calcopirita por classe de liberação e por fração granulométrica em relação à alimentação

Nilce Alves dos Santos

Modelamento de Flotação por Classes de Tamanho e Liberação - Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)– Escola de Engenharia -Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2018.

	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita											
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93-100%	
Tamanho (um)	Distribuição % da recuperação de calcopirita por classe de liberação e por fração granulométrica em relação à alimentação											Total
212	0,00	0,01	0,34	0,75	0,94	0,81	0,54	0,21	0,06	0,01	0,00	3,6%
150	0,00	0,06	0,33	0,79	1,22	1,53	1,63	1,52	1,14	0,57	0,22	9,0%
74	0,00	0,10	0,55	1,18	1,79	2,25	2,53	2,69	2,64	2,40	1,86	18,0%
44	0,00	0,04	0,16	0,29	0,44	0,62	0,85	1,16	1,62	2,45	8,13	15,8%
20	0,00	0,02	0,07	0,16	0,27	0,42	0,64	0,98	1,46	2,47	19,14	25,6%
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	9,10	9,1%
	0,0%	0,2%	1,5%	3,2%	4,7%	5,6%	6,2%	6,6%	6,9%	7,9%	38,5%	81,2%

A-VII.3.4 - Ensaio Cal 03 – Razão entre a recuperação de calcopirita por classe de liberação e área superficial de calcopirita na alimentação

Tamanho (um)	Classe de liberação segundo o teor % de calcopirita										
	0	0,1- 15%	15 - 25%	25 - 35%	35 - 45%	45- 55%	55 - 65%	65 - 75%	75 - 85%	85 - 93%	93 - 100%
Cal 03 - Rougher 1 - Razão entre recuperação de calcopirita por classe de liberação e área superficial de calcopirita na alimentação											
212	0	0,07	5,0	8,4	9,5	10,2	10,65	11,0	11,3		
150	0	0,76	3,2	5,2	6,4	7,2	7,77	8,2	8,5	8,6	8,8
74	0	0,92	1,7	2,5	3,0	3,3	3,53	3,8	4,0	4,2	4,4
44	0	0,37	0,95	1,3	1,6	1,7	1,88	2,1	2,2	2,5	2,7
20	0	0,20	0,32	0,45	0,55	0,64	0,71	0,78	0,84	0,89	1,2
10	0	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,50