



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas
Tel.: (31) 3409-1801 e-mail: ppgem@demet.ufmg.br



Dissertação de Mestrado

Grau de Liberação de Diferentes Tipos de Minério de Ferro das Minas de Alegria
(Mariana-MG) e sua Influência nas Etapas de Cominuição e Concentração

Autor: Rafael de Souza Rodrigues

Orientador: Paulo Roberto Gomes Brandão

Maio/2016

Rafael de Souza Rodrigues

Grau de Liberação de Diferentes Tipos de Minério de Ferro das Minas de Alegria
(Mariana-MG) e sua Influência nas Etapas de Cominuição e Concentração

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia da UFMG
2016

“Na vida, não vale tanto o que temos, nem tanto importa o que somos...”

Vale o que realizamos com aquilo que possuímos e, acima de tudo,

importa o que fazemos de nós!”

Emmanuel (Chico Xavier)

AGRADECIMENTOS

É uma tarefa extremamente difícil mas profundamente gratificante, retratar, em poucas palavras, a gratidão que tenho pelas pessoas que participaram, direta ou indiretamente, desta conquista.

Agradecimento especial ao professor, orientador e amigo Paulo Brandão, pelos ensinamentos, pela paciência, pela compreensão, pela parceria e pela orientação propriamente dita.

À Samarco pela oportunidade, apoio e confiança. A João Pedro, Wagner Milagres, Luiz Eduardo, Edmilson Freitas e Geraldo Xavier pela oportunidade e apoio irrestrito à condução deste trabalho.

À equipe de geologia pela amizade, parceria, incentivo, amparo, e pelas incansáveis discussões que deram fundamentos para a realização dessa pesquisa. Bonfioli, Sheila Bárbara, Samuel, João Paulo, Pamela e Mauro, muito obrigado!

À equipe do planejamento de mina pelo total apoio e confiança nos trabalhos do grupo de geometurgia. À toda equipe da engenharia de processo e beneficiamento pelo suporte e confiança nos estudos conduzidos pelo grupo de geometurgia. Ao Marcos Gomes pelo incentivo que sempre fez para a realização desta pesquisa.

Agradecimento a toda equipe do laboratório da SGS Geosol, em especial ao Alexsandro pela brilhante condução da equipe na realização dos testes e análises.

À equipe do LCP pelo apoio na realização dos ensaios de requerimento energético de moagem e preparação das amostras para análises mineralógicas.

À Ludmila Motta pelo apoio e incentivo, pelos ensinamentos e pelas análises mineralógicas no MLR, fundamentais nesta pesquisa.

Ao Willian e Bruno pela disponibilidade e dedicação nas análises no MLA realizadas no Centro de Microscopia da UFMG. Ao Itamar por todo incentivo, toda ajuda e disponibilidade na realização das análises no MLA.

Agradecimento aos amigos, meus professores e consultores, Paulo Mapa e Leônidas. As incansáveis discussões, os inúmeros ensinamentos, a disponibilidade, a ajuda irrestrita e todo incentivo, foram fundamentais para origem e conclusão deste trabalho.

Ao Álvaro Gabriel, pela primeira oportunidade. Um professor que compartilhou todo seu conhecimento para embasar todas as ideias que fundamentaram essa pesquisa.

À Júnia Rocha, pelo apoio, ensinamentos, pelo companheirismo e amizade. Por ser uma das maiores incentivadoras para a realização deste trabalho de pesquisa.

Ao Leonardo Bonfioli pelos ensinamentos, pelas infinitas discussões e troca de ideias, pelo exemplo que é, pela parceria, pelo amparo e amizade. Sem dúvidas que este trabalho não existiria sem sua ajuda.

Reservo um agradecimento e gratidão à minha família! É com minha família que passo os melhores momentos da minha vida, com quem compartilho minhas alegrias, é para onde volto e tenho amparo em minhas dificuldades.

À minha mãe, Elisabete, por tudo que representa em minha vida. Capaz de formar uma família maravilhosa, a quem devo tudo pela pessoa que me tornei. Aos meus irmãos Conrado, Gustavo e Thiago pelo exemplo que são. É uma honra e uma sorte muito grande ser o mais novo deles, que são meus amigos, que admiro e espelho em praticamente tudo que faço.

À vó Lalá, pelo carinho, pela chance de viver ao lado de um espírito tão evoluído.

À minha amada esposa Karine. Um ser humano fantástico, com caráter irretocável. Uma fonte de inspiração, pela pessoa que é, pela sua dedicação e empenho em tudo que faz. Tenho a honra e o privilégio de viver ao lado dessa pessoa magnífica, que amo muito, e que viverei ao lado pelo resto dessa minha vida, e também em outras!

Agradeço também a toda família da Karine pelo carinho, pelo apoio e principalmente por permitir que eu fizesse parte e convivesse com essa que hoje é minha família!

Meu pai..... dedico este trabalho a ele. Meu pai que me educou, ensinou sobre os valores, me apresentou a ética, me mostrou a bondade, traduziu a amizade, revelou o que é caridade, me apoiou nas dificuldades, incentivou na caminhada, alertou para os erros, parabenizou pelos acertos. Meu pai deixou uma herança que faz toda diferença em minha vida, a busca pelo conhecimento.

Meu pai, ao final de sua jornada, me deu de presente o melhor dos conselhos, que levo por todos os momentos. Me ensinou a valorizar a vida e a não temer à morte. A cada dia que vivo, aproveito da melhor forma possível, os melhores momentos, ao lado das pessoas que amo. A cada dia que vivo, é um a menos na contagem regressiva para eu reencontrá-lo.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Objetivo	2
2.1 Objetivos específicos	2
3. Revisão Bibliográfica	3
3.1 Quadrilátero Ferrífero: Geologia regional e aspectos gerais	3
3.2 Formação ferrífera bandada	7
3.3 Gênese do minério de ferro	9
3.4 Minérios e minerais do Complexo Alegria - Samarco Mineração	12
3.4.1 Hematita	15
3.4.2 Magnetita	16
3.4.3 Goethita	17
3.5 Tipologia dos minérios de ferro do Complexo Alegria – Samarco Mineração	18
3.6 Processo produtivo da Samarco Mineração	24
3.7 Cominuição	30
3.7.1 Eficiência de moagem	31
3.7.2 Ensaios de requerimento energético de moagem	36
3.7.3 Requerimento energético de moagem como previsibilidade do comportamento dos tipos de minérios	38
3.7.4 Mecanismos de fratura das partículas	42
3.8 Liberação das fases minerais	43
3.9 Caracterização de minérios via microscopia ótica de luz refletida (MLR)	50
3.10 Caracterização de minérios por análise digital de imagens	54
3.10.1 Imagem digital	54
3.10.2 Processamento e análise digital de imagens	62
3.10.3 Mineral Liberation Analyzer (MLA)	66
4. Metodologia	72
4.1 Seleção e coleta das amostras	72
4.2 Caracterização tecnológica	78
4.2.1 Análise granulométrica	83
4.2.2 Requerimento energético de moagem	83
4.2.3 Moagem	85
4.2.4 Deslamagem	85
4.2.5 Flotação	85
4.3 Caracterização microestrutural	86
4.3.1 Análises químicas	86

4.3.2	Caracterização mineralógica	87
5.	Resultados e discussão	90
5.1	Distribuição granulométrica	90
5.2	Análise química do ROM	98
5.3	Requerimento energético de moagem	100
5.4	Estudo do grau de liberação no processo de moagem	105
5.5	Deslamagem	119
5.5.1	Qualidade química da alimentação da flotação	121
5.5.2	Composição mineralógica	127
5.6	Estudo do grau de liberação na alimentação da flotação	142
5.7	Flotação	182
5.7.1	Estudo do posicionamento dos tipos de partículas após o processo de flotação	188
5.7.2	Hipóteses para explicar a baixa seletividade do minério da AGEO 91	218
6.	Conclusões	230
7.	Sugestões para trabalhos futuros	231
8.	Referências bibliográficas	232

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.....	5
Figura 3.2 – Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.....	6
Figura 3.3 – Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Dorr, 1969; extraído de Mendes 2011) com destaque para localização de algumas das principais jazidas de minério de ferro.....	13
Figura 3.4 – Fotos de furos de sonda de diferentes compacidades, baseado no retido em 3/8”.....	24
Figura 3.5 – Fluxograma esquemático do processo produtivo da Samarco Mineração.....	26
Figura 3.6 – Fluxograma do concentrador I da Samarco.....	28
Figura 3.7 – Fluxograma do concentrador II da Samarco.....	29
Figura 3.8 – Fluxograma do concentrador III da Samarco.....	29
Figura 3.9 – Resultado do ensaio de requerimento energético com a curva exponencial ajustada. O valor de energia é calculado considerando 10% retido em 0,15mm.....	38
Figura 3.10 – Equação para cálculo do requerimento energético de moagem, segundo análise de regressão dado pelo Minitab.....	40
Figura 3.11 - Imagem do Minitab da análise de resíduos pelas suposições de normalidade dos dados, imagem (A) e (B), variância constante, imagem (C), e independência dos dados, imagem (D).....	41
Figura 3.12 - Mapa da mina de Alegria Norte com distribuição dos valores de energia em kWh/t.....	41
Figura 3.13 – Mecanismos de fratura, energia aplicada e distribuição dos fragmentos resultantes.....	43
Figura 3.14 – Exemplificação de partículas livres e classes de composição de partículas mistas em uma avaliação de liberação no campo do microscópio.....	45

Figura 3.15 – fotomicrografias exemplificando os quatro tipos de partículas mistas descritas por Gaudin (1939). (a) espécies justapostas, (b) partículas tipo vênulas, (c) recobrimento e (d) inclusões.....	48
Figura 3.16 – (a) fotomicrografia de um itabirito friável com partículas com tendência de liberação por destacamento. (b) fotomicrografia de um itabirito com partículas com tendência de liberação por redução de tamanho.....	49
Figura 3.17 – exemplificação esquemática para classificação das partículas, livres e mistas.....	51
Figura 3.18 – Representação esquemática de uma partícula mista tipo 4, antes e depois do processo de moagem na malha de 0,15mm, gerando novas partículas mistas.....	52
Figura 3.19 – Exemplo do gráfico de apresentação dos tipos de partículas livres e mistas.....	53
Figura 3.20 – Representação de uma imagem digital de 8 bits, destacando de forma numérica a intensidade dos <i>pixels</i>	55
Figura 3.21 – Imagem digital com variação de resolução espacial e de intensidade...56	56
Figura 3.22 – Exemplo de uma imagem monocromática de 8 <i>bits</i> e o seu respectivo histograma.....	57
Figura 3.23 – exemplo de imagens monocromáticas com diferentes ajustes de brilho e contraste e seus respectivos histogramas.....	59
Figura 3.24 – (a) imagem digital RGB; (b) imagem componente na escala de vermelho; (c) imagem componente na escala de verde; (d) imagem componente na escala de azul.....	61
Figura 3.25 – Sequencia de etapas fundamentais do PADI.....	63
Figura 3.26 – (a) imagem em 256 níveis de cinza; (b) histograma da imagem indicando os limiares de corte; (c) imagem segmentada.....	65
Figura 3.27 – (a) Imagem por elétrons retroespalhados. (b) Imagem de raios X. (c) Imagem com a partícula segmentada e os grãos identificados com diferentes cores, confirmado pela composição via EDS.....	70

Figura 3.28 – (a): exemplo do modo de medição XBSE, com a aquisição de espectros de raios-X no <i>centroid</i> de cada fase segmentada. (b): exemplo do modo de medição GXMAP, com a aquisição de espectros de raios-X segundo uma malha pré-definida para as fases selecionadas de acordo com tons de cinza.....	71
Figura 4.1 – Localização aproximada das amostras coletadas no mapa geológico-tipológico do Complexo Alegria, minas da Samarco Mineração.....	73
Figura 4.2 – (A) Detalhe do afloramento minério da AGEO 88. (B) Aspecto geral do minério da AGEO 88 após desmonte por trator.....	74
Figura 4.3 – (A) Aspecto geral do minério da AGEO 77 após o desmonte. (B) Detalhe dos blocos gerados após a detonação por explosivos. (C) e (D) Detalhe dos fragmentos demonstrando o alto grau de cimentação da rocha.....	75
Figura 4.4 – (A) Aspecto geral do minério da AGEO 72 após desmonte por explosivo. (B) Detalhe de um fragmento do minério da AGEO 72.....	76
Figura 4.5 – (A) e (B) Afloramento do minério da AGEO 107. (C) Aspecto do minério da AGEO 107 após desmonte por explosivos. (D) detalhe dos fragmentos (lamelares) gerados após desmonte.....	77
Figura 4.6 – (A) e (B) Aspecto geral do minério da AGEO 91. (C) Detalhe do minério da AGEO 91 <i>in situ</i> . (D) Detalhe da fragmentação do minério.....	77
Figura 4.7 – Fluxograma de caracterização das amostras.....	78
Figura 4.8 – Fotos dos peneiradores vibratórios análise granulométrica série grossa (A) e séries média e fina (B).....	79
Figura 4.9 – Fotos dos britadores para 9,4mm (A) e 2mm (B).....	80
Figura 4.10 – Fotos do quarteador rotativo tipo carrossel para diferentes produtos, britado em 9,4mm (A) e britado em 2,0mm (B).....	80
Figura 4.11 – Foto do moinho 12x12” utilizado no ensaio de requerimento energético.....	81
Figura 4.12– Fotos da cuba de deslamagem e agitador mecânico.....	82
Figura 4.13– Fotos da célula de flotação.....	82

Figura 4.14 – Resultado do ensaio de requerimento energético com a curva exponencial ajustada. O valor de energia é calculado considerando 10% retido em 150µm.....	84
Figura 4.15 – Imagem do sistema MLA do Centro de Microscopia da UFMG.....	89
Figura 5.1 – Gráfico de distribuição granulométrica das amostras tal e qual para a séries de peneiras Tyler.....	91
Figura 5.2 – Gráfico de distribuição granulométrica da AGEO 77 considerando a amostra tal e qual e britada a 9,4mm.....	95
Figura 5.3 – Gráfico de distribuição granulométrica de todas as amostras tal e qual em comparação à distribuição granulométrica da AGEO 77 britada a 9,4mm.....	96
Figura 5.4 – Gráfico de distribuição granulométrica das AGEO 72 e AGEO 107 considerando a amostra tal e qual e britada a 9,4mm.....	97
Figura 5.5 – Gráfico de distribuição granulométrica das AGEO 88 e AGEO 91 considerando a amostra tal e qual e britada a 9,4mm.....	98
Figura 5.6 – Curvas obtidas no ensaio de requerimento energético da moagem para as amostras estudadas. Destaque para a linha tracejada marcando a especificação da moagem, 10% retido em 0,15mm.....	100
Figura 5.7 – Curva exponencial ajustada com a função equivalente para cada amostra.....	101
Figura 5.8 – AGEO 88: Gráfico do ensaio de requerimento energético de moagem integrado com a distribuição dos tipos de partículas mistas + livres e os respectivos valores de grau de liberação do quartzo.....	109
Figura 5.9 – AGEO 91: Gráfico do ensaio de requerimento energético de moagem integrado com a distribuição dos tipos de partículas mistas + livres e os respectivos valores de grau de liberação do quartzo.....	111
Figura 5.10 – AGEO 72: Gráfico do ensaio de requerimento energético de moagem integrado com a distribuição dos tipos de partículas mistas + livres e os respectivos valores de grau de liberação do quartzo.....	113

Figura 5.11 – AGEO 107: Gráfico do ensaio de requerimento energético de moagem integrado com a distribuição dos tipos de partículas mistas + livres e os respectivos valores de grau de liberação do quartzo.....	117
Figura 5.12 – AGEO 77: Gráfico do ensaio de requerimento energético de moagem integrado com a distribuição dos tipos de partículas mistas + livres e os respectivos valores de grau de liberação do quartzo.....	118
Figura 5.13 - Fotomicrografia da amostra AGEO 72 – Underflow da deslamagem – fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Hematita martítica com resíduos de magnetita; 2 = Goethita botrioidal + quartzo; 3 = Anfibólio + goethita pseudomórfica de anfibólio + hematita martítica. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.....	128
Figura 5.14 – Fotomicrografia da amostra AGEO 72 – Underflow da deslamagem – fração global. Destaque para uma partícula mista complexa tipo 4, composta por goethita pseudomórfica de anfibólio (G), grãos de hematita martítica (HM) e de quartzo (Q). (A) MEV- BSED, (B) MEV-ETD.....	130
Figura 5.15 - Fotomicrografia da amostra AGEO 77 – Underflow da deslamagem – fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Magnetita martitizada; 2 = Hematita martítica; 3 = Goethita botrioidal; 4 = Quartzo; 5 = Goethita pseudomórfica de anfibólio. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.....	131
Figura 5.16 - Fotomicrografia da amostra AGEO 77 – Underflow da deslamagem – fração global. Partícula em destaque composta por anfibólio + goethita pseudomórfica de anfibólio + hematita martítica + magnetita martitizada. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 20x, ocular de 10x.....	131
Figura 5.17 - Fotomicrografia da amostra AGEO 77 – Underflow da deslamagem – fração + 0,075mm. Partícula composta por quartzo + goethita botrioidal + hematita martítica + magnetita martitizada. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 20x, ocular de 10x.....	132
Figura 5.18 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 - Underflow da deslamagem: fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Magnetita martitizada; 2 = Hematita martítica; 3 = Hematita lamelar; 4 = Goethita botrioidal; e 5 = Quartzo. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.....	133

Figura 5.19 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 - UF - FRAÇÃO: GLOBAL. Partícula composta por goethita botrioidal com resíduos de hematita martítica associada aos grãos de quartzo. Partículas do tipo 2 - grãos de quartzo com inclusões de óxidos de ferro. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 20x, ocular de 10x.....	134
Figura 5.20 – Fotomicrografia da amostra AGEO 88 - Underflow da deslamagem: fração global. Aspecto geral do minério mostrando grãos de quartzo totalmente liberados, grãos de hematita martítica associados à goethita botrioidal e partículas liberadas de goethita. (A) MEV- BSED, (B) MEV-ETD.....	135
Figura 5.21 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 - Underflow da deslamagem: fração global. Belíssimo grão de hematita martítica exibindo sua textura típica em treliça. MEV- BSED.....	136
Figura 5.22 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 - Underflow da deslamagem: fração global. Belíssimo grão de hematita martítica, goethitizada, em meio a goethita botrioidal. MEV- BSED.....	136
Figura 5.23 - Fotomicrografia da amostra AGEO 91 - Underflow da deslamagem - fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Hematita martítica; 2 = Goethita botrioidal; 3 = Quartzo; 4 = Magnetita martitizada + goethita botrioidal; e 5 = Quartzo. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.....	137
Figura 5.24 - Fotomicrografia da amostra AGEO 91 - Underflow da deslamagem: fração global. Partícula apresentando cristais de hematita martítica (HM) envolvidos por uma matriz de caulinita (C). MEV- BSED.....	139
Figura 5.25 - Fotomicrografia da amostra AGEO 91 - Underflow da deslamagem: fração global. Partícula apresentando grande grão de rutilo e cristais de hematita (H) envolvidos por uma matriz de caulinita (C). MEV- BSED.....	139
Figura 5.26 - Fotomicrografia da amostra AGEO 107 - Underflow da deslamagem - fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Hematita martítica; 2 = Hematita lamelar; 3 = Goethita botrioidal; 4 = Goethita terrosa; e 5 = Quartzo. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.....	140
Figura 5.27 - Fotomicrografia da amostra AGEO 107 - Underflow da deslamagem: fração global. Partícula mista constituída por hematita especular (HE), hematita martítica (HM), goethita (G) e quartzo (Q). MEV- BSED.....	141

Figura 5.28 – AGEO 88: Gráficos de setores com a distribuição dos tipos de partículas livres e mistas e valores de grau de liberação na alimentação da flotação, alíquota global e nas frações +0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm.....	144
Figura 5.29 - Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas da alimentação da flotação, alíquota global, AGEO 88.....	147
Figura 5.30 – Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas tipo 3, alimentação da flotação, alíquota -0,15mm +0,075mm.....	149
Figura 5.31 – Espectro de liberação do quartzo por classe de composição. AGEO 88: Alimentação da flotação, alíquota global.....	150
Figura 5.32 – Curva granulométrica das partículas livres e mistas da AGEO 88, alimentação da flotação, alíquota global.....	151
Figura 5.33 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 88, alimentação da flotação, alíquota global.....	152
Figura 5.34 – Gráficos com as associações mineralógicas das principais fases constituintes do minério da AGEO 88, alimentação da flotação, alíquota global.....	153
Figura 5.35 - AGEO 72: Gráficos de setores com a distribuição dos tipos de partículas livres e mistas e valores de grau de liberação na alimentação da flotação, alíquota global e nas frações +0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm.....	156
Figura 5.36 - Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas da alimentação da flotação, alíquota global, AGEO 72.....	157
Figura 5.37 – Espectro de liberação do quartzo por classe de composição. AGEO 88 e AGEO 72: Alimentação da flotação, alíquota global.....	158
Figura 5.38 – Curva granulométrica das partículas livres e mistas da AGEO 88 e AGEO 72: alimentação da flotação, alíquota global.....	159
Figura 5.39 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 72, alimentação da flotação, alíquota global.....	160
Figura 5.40 – Gráficos com as associações mineralógicas das principais fases constituintes do minério da AGEO 88, alimentação da flotação, alíquota global.....	161

Figura 5.41 - AGEO 77: Gráficos de setores com a distribuição dos tipos de partículas livres e mistas e valores de grau de liberação na alimentação da flotação, alíquota global e nas frações +0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm.....	163
Figura 5.42 - Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas da alimentação da flotação, alíquota global, AGEO 77.....	164
Figura 5.43 – Espectro de liberação do quartzo por classe de composição. AGEO 88, AGEO 72 e AGEO 77: Alimentação da flotação, alíquota global.....	166
Figura 5.44 – Curva granulométrica das partículas livres e mistas da AGEO 88, AGEO 72 e AGEO 77: alimentação da flotação, alíquota global.....	167
Figura 5.45 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 77, alimentação da flotação, alíquota global.....	168
Figura 5.46 – Gráficos com as associações mineralógicas das principais fases constituintes do minério da AGEO 77, alimentação da flotação, alíquota global.....	169
Figura 5.47 – Curva granulométrica dos grãos de goethita das AGEO 77, AGEO 72 e AGEO 88: alimentação da flotação, alíquota global.....	169
Figura 5.48 - AGEO 91: Gráficos de setores com a distribuição dos tipos de partículas livres e mistas e valores de grau de liberação na alimentação da flotação, alíquota global e nas frações +0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm.....	171
Figura 5.49 – Espectro de liberação do quartzo por classe de composição. AGEO 88, AGEO 72, AGEO 77 e AGEO 91: Alimentação da flotação, alíquota global.....	172
Figura 5.50 – Curva granulométrica das partículas livres e mistas da AGEO 88, AGEO 72, AGEO 77 e AGEO 91: alimentação da flotação, alíquota global.....	173
Figura 5.51 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 77, alimentação da flotação, alíquota global.....	174
Figura 5.52 – Gráficos com as associações mineralógicas das principais fases constituintes do minério da AGEO 91, alimentação da flotação, alíquota global.....	174
Figura 5.53 - AGEO 107: Gráficos de setores com a distribuição dos tipos de partículas livres e mistas e valores de grau de liberação na alimentação da flotação, alíquota	

global e nas frações +0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm.....	177
Figura 5.54 - Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas da alimentação da flotação, alíquota global, AGEO 107.....	178
Figura 5.55– Espectro de liberação do quartzo por classe de composição. AGEO 88, AGEO 72, AGEO 77, AGEO 91 e AGEO 107: Alimentação da flotação, alíquota global.....	179
Figura 5.56 – Curva granulométrica das partículas livres e mistas da AGEO 88, AGEO 72, AGEO 77, AGEO 91 e AGEO 107: alimentação da flotação, alíquota global.....	180
Figura 5.57 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 107, alimentação da flotação, alíquota global.....	181
Figura 5.58 – Gráficos com as associações mineralógicas das principais fases constituintes do minério da AGEO 107: alimentação da flotação, alíquota global.....	182
Figura 5.59 – AGEO 88: Distribuição dos tipos de partículas mistas e livres, grau de liberação do quartzo ($G.L_{qtz}$) e dos óxidos/hidróxido de ferro ($G.L_{óxi}$), qualidade química das alíquotas globais da alimentação, concentrado e rejeito da flotação.....	190
Figura 5.60 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 – concentrado – fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Magnetita martitizada; 2 = Hematita martítica; 3 = Hematita lamelar; 4 = Goethita botrioidal. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.....	191
Figura 5.61 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 - Concentrado: fração global. Aspecto geral do concentrado com predominância de partículas compostas essencialmente por óxidos/hidróxido de ferro. MEV- BSED.....	191
Figura 5.62 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 – rejeito – fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Quartzo; 2 = Hematita lamelar; 3 = Goethita botrioidal. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.....	192
Figura 5.63 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 88, rejeito da flotação, alíquota global.....	192

Figura 5.64 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 - Concentrado: fração global. (a) partícula composta por hematita martítica contornada por goethita. (b) destaque da textura em treliça da hematita martítica. MEV- BSED.....	194
Figura 5.65 - AGEO 72: Distribuição dos tipos de partículas mistas e livres, grau de liberação do quartzo (G.L _{qtz}) e dos óxidos/hidróxido de ferro (G.L _{óxi}), qualidade química das alíquotas globais da alimentação, concentrado e rejeito da flotação.....	196
Figura 5.66 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 72, rejeito da flotação, alíquota global.....	197
Figura 5.67 – AGEO 72: Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas do concentrado e rejeito da flotação, alíquota global.....	199
Figura 5.68 - Fotomicrografia da amostra AGEO 72 - Concentrado: fração global. Aspecto geral do concentrado da AGEO 72. MEV- BSED.....	200
Figura 5.69 - Fotomicrografia da amostra AGEO 72 - Rejeito: fração global. Aspecto geral do concentrado da AGEO 72. MEV- BSED.....	200
Figura 5.70 - Fotomicrografia da amostra AGEO 72 - Concentrado: fração global. Destaque no centro da imagem para uma partícula mista complexa tipo 4, composta por quartzo (Q), goethita (G) e hematita (H). MEV- BSED.....	201
Figura 5.71 - Fotomicrografia da amostra AGEO 72 - Concentrado: fração global. Belíssima goethita fibrosa, pseudomórfica de anfibólio. MEV- BSED.....	201
Figura 5.72 – AGEO 77: Distribuição dos tipos de partículas mistas e livres, grau de liberação do quartzo (G.L _{qtz}) e dos óxidos/hidróxido de ferro (G.L _{óxi}), qualidade química das alíquotas globais da alimentação, concentrado e rejeito da flotação.....	203
Figura 5.73 – AGEO 77: Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas do concentrado e rejeito da flotação, alíquota global.....	205
Figura 5.74 - Fotomicrografia da amostra AGEO 77 – concentrado – fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Magnetita martitizada; 2 = Hematita martítica; 3 = Goethita botrioidal; 4 = Quartzo; 5 = Anfibólio; 6 = Goethita pseudomórfica de anfibólio. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.....	206
Figura 5.75 - Fotomicrografia da amostra AGEO 77 - Concentrado: fração global. Aspecto geral do minério. MEV- BSED.....	206

Figura 5.76 - Fotomicrografia da amostra AGEO 77 - Concentrado: fração global. Na região central da imagem, um exemplo de uma partícula mista complexa tipo 4, composta por quartzo (Q), goethita pseudomórfica de anfibólio (G) e hematita (H). MEV- BSED.....	207
Figura 5.77 - Fotomicrografia da amostra AGEO 77 – rejeito – fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Magnetita martitizada; 2 = Hematita martítica; 3 = Quartzo; 4 = Anfibólio. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.....	207
Figura 5.78 - Fotomicrografia da amostra AGEO 77 - rejeito: fração global. Aspecto geral do minério. MEV- BSED.....	208
Figura 5.79 – AGEO 107: Distribuição dos tipos de partículas mistas e livres, grau de liberação do quartzo (G.L _{qtz}) e dos óxidos/hidróxido de ferro (G.L _{óxi}), qualidade química das alíquotas globais da alimentação, concentrado e rejeito da flotação.....	210
Figura 5.80 - AGEO 107: Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas do concentrado e rejeito da flotação, alíquota global.....	211
Figura 5.81 - Fotomicrografia da amostra AGEO 107 – concentrado – fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Hematita martítica; 2 = hematita especular; 3 = goethita botrioidal; 4 = quartzo. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.....	212
Figura 5.82 - Fotomicrografia da amostra AGEO 107 – rejeito – fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Hematita martítica; 2 = hematita especular; 3 = goethita botrioidal; 4 = quartzo. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.....	213
Figura 5.83 - AGEO 91: Distribuição dos tipos de partículas mistas e livres, grau de liberação do quartzo (G.L _{qtz}) e dos óxidos/hidróxido de ferro (G.L _{óxi}), qualidade química das alíquotas globais da alimentação, concentrado e rejeito da flotação.....	215
Figura 5.84 – AGEO 91: Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas do concentrado, alíquota global.....	216
Figura 5.85 - Fotomicrografia da amostra AGEO 91 – concentrado – fração global. Aspecto geral do minério. 1 = magnetita martitizada + goethita botrioidal; 2 = hematita martítica; 3 = goethita botrioidal; 4 = quartzo. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.....	216

Figura 5.86 - Fotomicrografia da amostra AGEO 91 – rejeito – fração global. Aspecto geral do minério. 1 = quartzo; 2 = hematita martítica + goethita; 3 = magnetita. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.....	217
Figura 5.87 – Aspecto geral do concentrado da AGEO 91. Lupa binocular.....	218
Figura 5.88 - Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 91, concentrado da flotação, alíquota global.....	219
Figura 5.89 - Curva granulométrica dos grãos de quartzo da AGEO 91, concentrado e rejeito da flotação, alíquota global.....	220
Figura 5.90 - Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 91, rejeito da flotação, alíquota global.....	220
Figura 5.91 - Curva granulométrica dos grãos dos óxidos/hidróxido de ferro. AGEO 91, concentrado e rejeito da flotação, alíquota global.....	221
Figura 5.92 - Fotomicrografia da amostra AGEO 91 - concentrado: fração global. Partícula de caulinita (c) envolvendo grãos de hematita martítica (HM). MEV-BSED.....	224
Figura 5.93 – Estrutura cristalográfica da gibbsita e da caulinita.....	225
Figura 5.94 – Influência dos íons de alumínio na flotabilidade do quartzo, em função do pH.....	227
Figura 5.95 – Ação conjunta de íons de alumínio e amido de milho na flotabilidade do quartzo, em pH 10.....	229

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Condições do ensaio de moagem.....	37
Tabela IV.1 – Dosagens de reagentes para o ensaio de flotação.....	86
Tabela V.1 – Análises granulométricas, séries de peneiras grossa, média e fina, das amostras: (A) AGEO 72, (B) AGEO 77, (C) AGEO 88, (D) AGEO 91, (E) AGEO 107. Destaque para as frações 9,4mm que corresponde à malha de controle para classificação do minério quanto a compacidade, fração 0,15mm que é a especificação da moagem e a fração 0,044mm que é especificação da remoagem, um item de controle do concentrado produzido, visando o transporte por mineroduto.....	92
Tabela V.2 - Composição química do ROM das amostras.....	98
Tabela V.3 – Valores de energia (kWh/t) das amostras estudadas obtidos no ensaio de requerimento energético de moagem.....	102
Tabela V.4 – Resultados do grau de liberação da alimentação da moagem nas frações + 0,15mm, - 0,15mm e na alíquota global.....	107
Tabela V.5 – Resultados das recuperações mássica e metálica e o percentual de lama das amostras na etapa de deslamagem.....	119
Tabela V.6 – Composição química da amostra global da lama (overflow da deslamagem).....	120
Tabela V.7 – Composição química da amostra global do underflow da deslamagem, ou seja, alimentação da flotação.....	122
Tabela V.8 – Composição química por faixa granulométrica do underflow da deslamagem.....	123
Tabela V.9 – Distribuição granulométrica das amostras após o processo de deslamagem.....	126
Tabela V.10 – Composição mineralógica da amostra global do underflow da deslamagem (alimentação da flotação), via microscopia ótica de luz refletida.....	127
Tabela V.11 – Composição mineralógica da amostra global do underflow da deslamagem (alimentação da flotação), via microscopia ótica de luz refletida.....	129

Tabela V.12 – Composição mineralógica da amostra global do underflow da deslamagem (alimentação da flotação), via microscopia ótica de luz refletida.....	145
Tabela V.13 – Resultados das recuperações mássica e metálica na etapa da flotação em bancada.....	183
Tabela V.14 – Composição química das alíquotas de concentrado das amostras estudadas.....	184
Tabela V.15 – Composição química das alíquotas de rejeito das amostras estudadas.....	186
Tabela V.16 – Resultados dos índices de seletividade para a etapa de flotação para cada uma das amostras estudadas.....	188
Tabela V.17 – Resultados (semiquantitativo) das análises por difração de raios-X das alíquotas de UF, Concentrado e Rejeito da AGEO 91.....	223

LISTA DE NOTAÇÕES

ADI - análise digital de imagem

AGEO – Amostra de geometalurgia

A.M. – Análise mineralógica

A.Q. – Análise química

BIF's - *Banded Iron Formations*

Blaine – Área superficial específica das partículas (cm^2/g), determinada em um permeâmetro de Blaine.

BSE – Elétrons retroespalhados

BSED – Detector de elétrons retroespalhados

cut off's – teor de corte

D80 – Tamanho no qual 80% das partículas que entram no classificador se dirigem para o *undersize*.

DRX – difratometria de raios-X.

DTM – Determinação do tempo de moagem

EDS – Método de espectrometria por dispersão de energia

ETD – tipo de detector de elétrons secundários

G.L. – Análise do grau de liberação do quartzo

G.L_{qtz} - Grau de liberação do quartzo

G.L_{óxi} - Grau de liberação dos óxidos/hidróxido de ferro

GXMAP - *Grain X-ray mapping*

LCP – Laboratório de controle de processo

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

MLR – Microscópio de luz refletida

MLA – *Mineral liberation analyzer*

PADI - processamento e análise digital de imagem

PDI - processamento digital de imagens

PPC – Perda por calcinação

QEMSCAN - *Quantitative evaluation of materials by scanning electron microscopy*

SE - Elétrons secundários

SEM - *Scanning electron microscope*

SGM – Supergrupo Minas

TTG – Gnaisse da suíte tonalito-trondhjemitó-granodiorito

WI - *Work Index*

Wio - *Work Index* operacional

XBSE - *Extended BSE liberation analysis*

RESUMO

A liberação mineral, obtida pela redução do tamanho de partículas por meio do processo de cominuição, principalmente moagem, é um preceito básico para a etapa de flotação. Para o minério de ferro, a determinação do grau de liberação é realizada tradicionalmente pelo método de Gaudin. No entanto, a mera quantificação do grau de liberação do quartzo não oferece todas as informações suficientes para a previsibilidade no processo de flotação. A caracterização mineralógica com aprofundamento do estudo da liberação mineral, utilizando técnicas complementares como microscópio de luz refletida e o MLA, permite a análise qualitativa das partículas mistas e a maneira como as espécies minerais encontram-se associadas. Estas são algumas das informações fundamentais para o entendimento do comportamento do minério na etapa de concentração. O objetivo deste trabalho foi estudar a liberação mineral de cinco tipos distintos de itabiritos com o entendimento da obtenção da liberação mineral em diferentes graus de cominuição e a avaliação do posicionamento das partículas mistas diante do processo de flotação. Os tipos de itabiritos estudados apresentaram comportamentos distintos ao processo de moagem. As amostras AGEO88 e AGEO91 apresentaram grau de liberação do quartzo maior que 98% e percentual de partículas mistas menor que 10%, já aos cinco minutos de moagem. As amostras AGEO72, AGEO77 e AGEO107 só exibiram condições razoáveis de liberação mineral aos vinte minutos de moagem. Ao final da moagem a AGEO72 obteve 90,2% de grau de liberação do quartzo restando ainda 26% de partículas mistas, a AGEO77 com apenas 71,5% de grau de liberação do quartzo apresentou 49% de partículas mistas e a AGEO107 exibiu 88,7% de grau de liberação do quartzo com 21% de partículas mistas. Após o processo de deslamagem, os minérios foram submetidos à caracterização mineralógica para estudo das condições de liberação mineral na alimentação da flotação. Corroborando os dados obtidos na moagem, os minérios da AGEO88 e AGEO91 exibiram condições ótimas de liberação mineral, totalmente favoráveis ao processo de flotação, com elevado grau de liberação do quartzo e a grande maioria das partículas, de quartzo e óxidos/hidróxido de ferro, liberadas. As demais amostras, AGEO72, AGEO77 e AGEO107 apresentaram condições de liberação mineral desfavoráveis ao processo de flotação, com valores de grau de liberação do quartzo de 89%, 78,6% e 88,6%, respectivamente, e proporção relevante de partículas mistas (>29%). O desempenho da AGEO88 no processo de flotação foi excelente, traduzido pela qualidade do concentrado por meio do teor de SiO₂ de apenas 0,79% e pelos índices de recuperação em peso (61,8%) e metálica

(89,6%). Para os minérios que apresentaram condições inadequadas de liberação foram obtidos concentrados de qualidade insatisfatória, com teor de SiO_2 de 3,71% para a AGEO72, 14,03% para AGEO77 e 3,35% para AGEO107. Os teores de ferro do rejeito para essas amostras foram acima de 20% e as recuperações em peso menores que 40% e recuperações metálicas inferiores a 65%. Surpreendente foi o desempenho da AGEO91, que frustrou qualquer expectativa, com teor de SiO_2 no concentrado de 18,2% e teor de ferro no rejeito de 24,3%. Com a pior qualidade dentre as amostras estudadas, é um minério que apresentou excelentes resultados pelo estudo de liberação mineral na alimentação da flotação, no entanto, algum outro fator contribuiu negativamente na seletividade do processo de flotação. A caracterização mineralógica dos diversos tipos de minério de ferro com foco na liberação mineral forneceu informações vitais para o entendimento do comportamento do minério nas etapas de moagem e flotação, o que se traduz em previsibilidade, constituindo um dos pilares na concepção de um modelo geometalúrgico.

ABSTRACT

The mineral liberation, obtained from reducing the particle size by grinding, is one of the basic concepts for the flotation process. Only the quantification of the liberation degree of quartz does not provide the necessary information for predictability in the flotation process. The characterization of mineral liberation, using complementary techniques such as optical microscopy and MLA, the qualitative analysis of mixed particles considering the different proportions of the constituent phases of these particles and mineralogical associations, detailing the distribution of the types of free and mixed particles, are some of the basic information for understanding the ore's behavior during comminution and concentration processes. The purpose of this work was to study the mineral liberation of five different types of itabirites, to determine and understand the influence of the mineral liberation in different degrees of comminution and to assess the distribution of the mixed particles after the flotation process. The studied itabirites types showed different behaviors in the grinding process. The samples AGEO88 and AGEO91 showed liberation of quartz higher than 98% and the percentage of mixed particles smaller than 10% after five minutes grinding. The samples AGEO72, AGEO77 and AGEO 107 only showed reasonable mineral liberation after twenty minutes grinding. At the end of grinding, the sample AGEO72 presented a 90.2% liberation degree of quartz, with 26% of mixed particles remaining; the sample AGEO77 with only 71.5% degree of liberation of quartz showed 49% of mixed particles and the sample AGEO107 presented 88.7% degree of liberation quartz with 21% of mixed particles. After the desliming stage, the samples were subjected to mineralogical characterization for studying the conditions for mineral liberation in the flotation process. In agreement with the data obtained in the grinding stage, the samples AGEO88 and AGEO91 showed excellent conditions of mineral liberation, completely favorable to the flotation process with a high degree of quartz liberation and the majority of particles (quartz and iron oxides and hydroxide) liberated. The remaining samples, AGEO72, AGEO77 and AGEO107 showed mineral liberation conditions unfavorable for the flotation process, with quartz liberation degrees of 89%, 78.6% and 88.6%, respectively, and relevant proportion of mixed particles (>29%). The flotation performance of the AGEO88 sample was excellent, with an iron concentrate having only 0.79% SiO₂ content and the metallurgical recovery close to 89%. For the samples that showed inadequate mineral liberation conditions, the iron concentrates obtained had unsatisfactory quality with SiO₂ content of 3.71% for AGEO72, 14.03% for AGEO77 and 3.35% for AGEO107. The iron contents in the tailings from these

samples were above 20% and the metallurgical recovery less than 65%. Amazing was the performance of AGEO 91, which frustrated all expectations, with SiO₂ content in the concentrate equal to 18.2% and 24.3% iron content in the tailings. The sample with the worst iron concentrate quality among the studied samples, showed excellent mineral liberation degree, however, some other factor have contributed negatively upon the selectivity in the flotation process. The mineralogical characterization of various types of itabirites focusing on the mineral liberation provided important information for understanding the behavior in the grinding and flotation processes, which contributes strongly to predictability, one of the pillars in the development of a geometallurgical model.

1. INTRODUÇÃO

O mercado de minério de ferro é uma atividade indissociável da produção e do consumo de aço, mercado tradicionalmente oscilante e bastante dependente da situação econômica mundial.

A grande demanda mundial por minério de ferro associada ao mercado extremamente aquecido entre os anos de 2004 e 2010, incentivou as grandes mineradoras brasileiras a buscar aumentos expressivos de produção a partir de consecutivas expansões de suas operações. Para suportar níveis cada vez maiores de produção foi necessário maximizar as reservas de minério.

A Samarco Mineração, uma das principais produtoras de pelotas de minério de ferro do mundo, concluiu em 2008 e 2014 dois grandes projetos de expansão, respectivamente, Projeto Terceira Pelotização (P3P) e Projeto Quarta Pelotização (P4P), com a implementação de dois novos concentradores e três novas usinas de pelotização, dobrando sua capacidade anual de produção de pelotas de minério de ferro.

O alto investimento no setor de pesquisa mineral, a incorporação de minérios de baixo teor de ferro e de maior dureza e a flexibilização de alguns *cut off's*, compreendem os fatores fundamentais que possibilitaram a Samarco a aumentar sua reserva para ordem de 3 bilhões de toneladas de minério, viabilizando tais projetos de expansão.

Contudo, o aproveitamento dos minérios de menor teor de ferro e maior compacidade impacta significativamente nas diversas etapas do processo produtivo da Samarco, sendo os processos de moagem e flotação os mais afetados. Minérios mais duros, mais consistentes, demandam uma maior energia para sua cominuição, acarretando em grande dificuldade para atender as especificações da moagem, considerando as taxas nominais de alimentação. Com isso, a obtenção da liberação mineral, necessária ao processo de flotação, é comprometida, prejudicando o atendimento às especificações de qualidade do concentrado e a obtenção de índices otimizados de recuperação metálica.

Indubitavelmente, é necessário estabelecer um modelo geometalúrgico como instrumento que garanta uma maior previsibilidade desde o planejamento de lavra até o controle integrado de qualidade dos concentrados e pelotas produzidas.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar o grau de liberação das espécies minerais em diferentes tipos de minério de ferro provenientes das minas de Alegria, da Samarco Mineração, com o entendimento da obtenção da liberação mineral em diferentes graus de cominuição e avaliação do posicionamento das partículas livres e mistas diante do processo de concentração por flotação catiônica reversa.

2.1 Objetivos específicos

- Determinação do grau de liberação em diferentes faixas granulométricas com a caracterização dos tipos de partículas mistas;
- Estudo do grau de liberação e associações mineralógicas via microscopia de luz refletida e pelo sistema *Mineral Liberation Analyzer (MLA)* ao longo de um fluxograma de caracterização tecnológica de cinco diferentes tipos de minério de ferro;
- Avaliar a aplicação do sistema *MLA* no estudo do grau de liberação de minério de ferro em comparação à microscopia de luz refletida.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Quadrilátero Ferrífero: Geologia regional e aspectos gerais

O Quadrilátero Ferrífero está localizado na borda sul do Cráton do São Francisco (Almeida, 1977), caracterizado por um formato grosseiramente quadrangular dado pela distribuição dos metassedimentos, de idade Paleoproterozóica, preservados nas grandes estruturas sinclinais e, pela ampla distribuição das formações ferríferas bandadas que dão forma e contorno a uma das mais importantes províncias metalogenéticas do mundo (Rosière & Chemale Jr., 2000.; Rosière *et al.*, 2008; Mendes, 2011).

O Quadrilátero Ferrífero pode ser dividido, conforme proposto por Dorr (1969), em três grandes unidades litoestratigráficas: os complexos metamórficos granito-gnáissicos diferenciados do Arqueano, incluindo os Complexos Bação, Bonfim, Caeté, Congonhas e Belo Horizonte, sequências supracrustais vulcano-sedimentares do Arqueano do tipo greenstone belt, associadas ao Supergrupo Rio das Velhas, e sequências metasedimentares paleo-proterozóicas do Supergrupo Minas (figura 3.1 e 3.2).

Os complexos granito-gnáissicos do Arqueano constituem o embasamento cristalino da região, compreendendo, em sua grande maioria, gnaisses TTG bandados e migmatizados (Noce, 1998). De acordo com Machado *et al.* (1989), foram formados entre 3,0 e 2,6 Ga e retrabalhados durante o evento Transamazônico.

O Supergrupo Rio das Velhas é composto por uma sequência de rochas vulcano-sedimentares do Arqueano, constituindo estruturas antiformais irregulares, sendo subdividido nos grupos Nova Lima e Maquiné (Rosière & Chemale Jr., 2000.; Mendes, 2011). O Grupo Nova Lima é atribuído a uma sequência de rochas verdes do tipo greenstone belt, de idade arqueana, composto por rochas vulcânicas de composição ácida a intermediária, basaltos e komatiitos, formações ferríferas bandadas, metacalcários e rochas siliciclásticas (Dorr, 1969). O Grupo Maquiné é subdividido nas formações Palmital e Casa Forte (Dorr, 1969).

O Supergrupo Minas (SGM) faz contato com as rochas do Supergrupo Rio das Velhas por discordância angular e erosiva (Dorr, 1969) e engloba metassedimentos

plataformais de idade paleo-proterozóica. É subdividido em quatro unidades, Grupo Caraça, Grupo Itabira, Grupo Piracicaba e Grupo Sabará (Dorr, 1969).

Na base do SGM encontram-se metassedimentos detríticos pertencentes ao Grupo Caraça, datados de 2,65 Ga (Carneiro *et al.*, 1995) como limite inicial de deposição do SGM, a partir de zircões detríticos, contidos nos metassedimentos. Essa sequência clástica é composta basicamente por conglomerados e quartzitos e é subdividida nas formações Moeda e Batatal.

O Grupo Itabira compreende as rochas formadas em um período de relativa estabilidade da plataforma com peneplanização e sedimentação química e carbonática (Carneiro *et al.*, 1995). É subdividido nas formações Cauê e Gandarela (Dorr, 1969). As rochas presentes na Formação Cauê estão em contato gradacional com os filitos da Formação Batatal. A Formação Cauê engloba o grande volume de formação ferrífera bandada e corpos de minérios enriquecidos presentes no Quadrilátero. Ocorrem itabiritos fácies óxido, dolomítico e anfibolítico, além de filitos e dolomitos subordinados. Em contato gradacional estão as rochas carbonáticas calcíticas e dolomíticas da Formação Gandarela. Estão presentes também nesta Formação, filitos, metaconglomerados intraformacionais e finas camadas de itabiritos (Dorr, 1969).

Babinski *et al.* (1995) *apud* Ribeiro (2003) propõe que a deposição das formações ferríferas teria ocorrido há cerca de 2,5 Ga enquanto que a sedimentação da Formação Gandarela é de 2,4 Ga.

O Grupo Piracicaba ocorre localmente em contato erosivo com as rochas do Grupo Itabira. É composto essencialmente por rochas sedimentares clásticas, pelíticas, psamíticas e químicas, constituindo filitos carbonáceos e ferruginosos, dolomitos, mármore e formações ferríferas bandadas (Dorr, 1969; Rosière & Chemale Jr., 2000). É subdividido nas formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro (Dorr, 1969).

Em discordância erosiva sobre as rochas do Grupo subjacente, o Grupo Sabará consiste de uma sequência *flysch*, composta por metagrauvas, filitos carbonáceos, metadiamicritos, metaconglomerados, formações ferríferas subordinadas e rochas metavulcânicas félsicas e intermediárias (Dorr, 1969). De acordo com Alkmim & Marshak (1998), a deposição do Grupo Sabará é relacionada à Orogenia Transamazônica. Carneiro *et al.* (1995) indicam que a sedimentação dessa unidade ocorre em 2,1 Ga, coincidente com o início do evento tectono-termal Transamazônico.

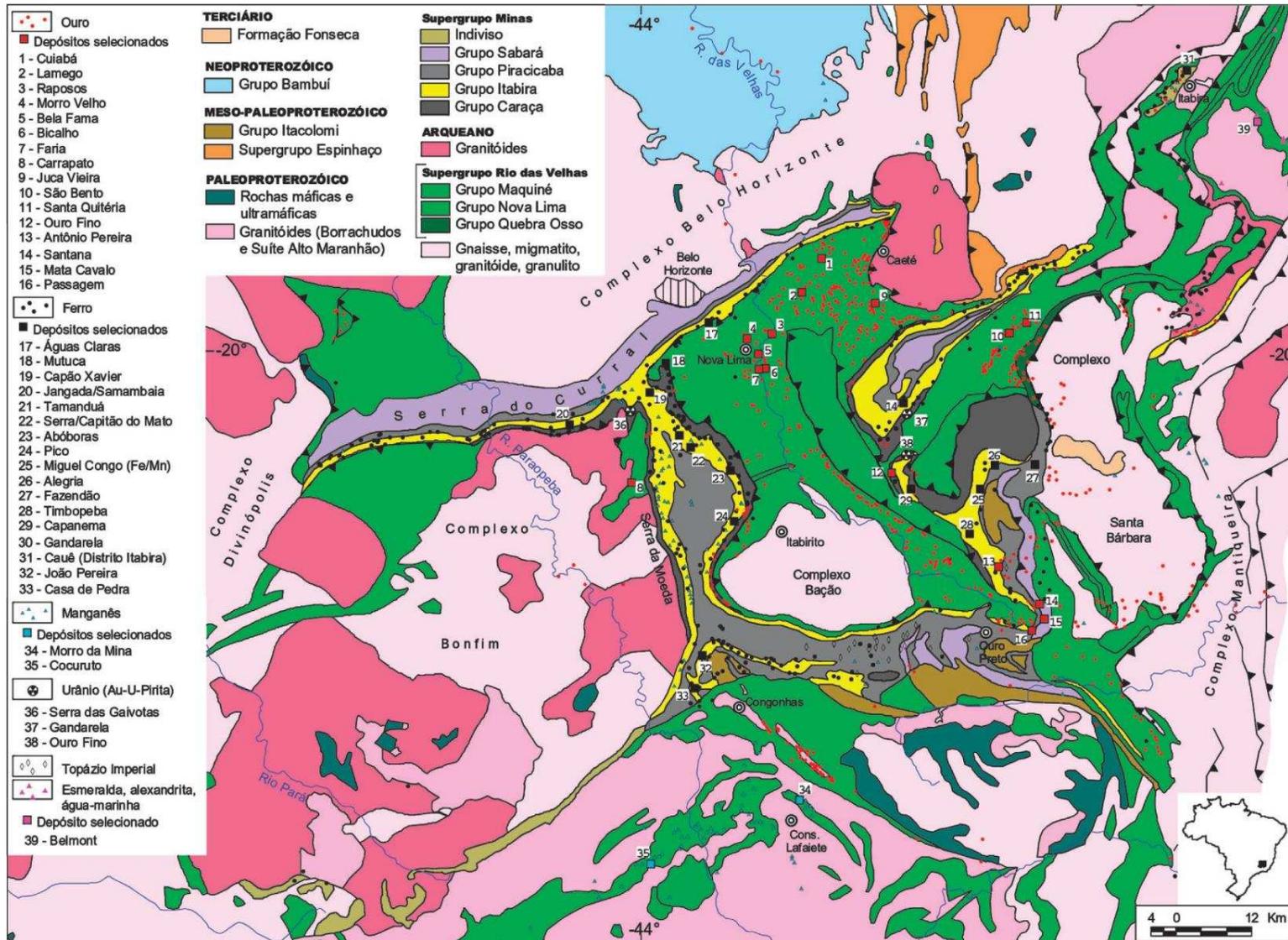


Figura 3.1 – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero. Bizzi *et al.* 2001 *apud* Ferreira 2013. Baseado em Dorr (1969).

No topo do SGM está o Grupo Itacolomi, em contato por discordância angular e erosiva com as rochas do Grupo Sabará. É portanto, a unidade mais jovem do Quadrilátero Ferrífero. É constituída basicamente por uma sequência molássica composta por quartzitos, metarcósios e metaconglomerados, com seixos de formação ferrífera (Dorr, 1969).

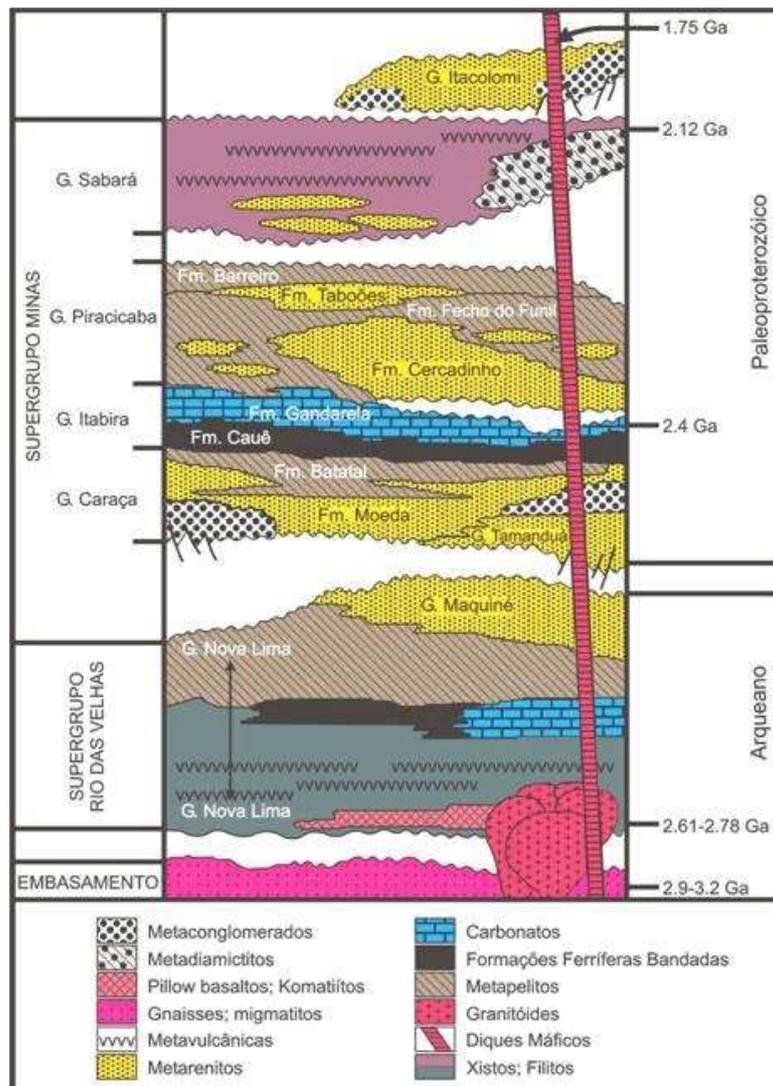


Figura 3.2 – Coluna estratiográfica do Quadrilátero Ferrífero. Modificado de Alkmim & Marshak (1998).

3.2 Formação ferrífera bandada

As formações ferríferas bandadas, também denominadas como *BIF's (Banded Iron Formation)* foram definidas por James (1983) como rochas finamente acamadadas ou laminadas, com alternância de camadas de chert (ou seu equivalente metamórfico) com camadas compostas predominantemente por minerais de ferro, principalmente hematita e magnetita, silicatos ou carbonatos. A goethita é encontrada apenas em rochas intemperizadas.

As formações ferríferas datam desde o Arqueano até o Neoproterozóico, sendo que as formações paleo e mesoarqueanas são menos abundantes estatisticamente do que as neoarqueanas e paleoproterozóicas (James, 1983).

As formações ferríferas são classificadas do tipo Algoma ou Lago Superior com base nas associações mineralógicas, ambiente de deposição e idades. As formações do tipo Algoma estão relacionadas a rochas vulcânicas e aos cinturões de rochas verdes *greenstone belt*, comumente do Pré-cambriano inferior e Fanerozóico (James, 1983).

As formações ferríferas do tipo Lago Superior estão relacionadas à sequência de rochas sedimentares plataformais paleoproterozóicas (James, 1983).

No Quadrilátero Ferrífero as formações ferríferas bandadas são denominadas de itabiritos (Eschwege, 1833), correspondendo a formações ferríferas bandadas metamorfizadas da fácies óxidos, compostos por óxidos de ferro na forma de magnetita, hematita ou martita e bandas de quartzo granular originados pela recristalização de bandas de chert e jaspe originais (James, 1954; Dorr, 1964).

Os itabiritos podem ser classificados em diferentes tipos composicionais, conforme proposto por Rosière & Chemale Jr. (2000). Segundo os autores, a distribuição dos diferentes tipos composicionais está condicionado por três fatores:

- I. Composição original dos sedimentos na bacia: em virtude da influência dos processos geológicos, tais como, metamorfismo, alteração hidrotermal, deformação e etc. A real distribuição dos sedimentos é muito difícil de se avaliar.
- II. Estruturação tectônica: o contraste da reologia dos diferentes tipos de rochas presentes na coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero resultou em uma estruturação interna extremamente complexa com superposição de dobras e

desenvolvimento de zonas de cisalhamento, obliterando diversas características sedimentares e diagenéticas.

- III. Metamorfismo e processos hidrotermais: o processo metamórfico resulta em transformações mineralógicas, notáveis em fácies mais impuras com o aumento de componentes terrígenos com a cristalização de anfibólios e cloritas. Os processos hidrotermais provocam grandes modificações na composição original da formação ferrífera, podendo obliterar parcial ou completamente suas características “primárias”.

Além das reações metamórficas, que refletem principalmente nas associações mineralógicas dos silicatos, os itabiritos do Quadrilátero Ferrífero sofreram um intenso processo de oxidação e alterações hidrotermais, que podem ser verificados a partir de diferentes características mineralógicas (Rosière & Chemale Jr., 2000)., principalmente:

- Progressiva martitização da magnetita;
- Presença de cristais de hematita com habitus e morfologia atípica, indicando pseudomorfismo provavelmente em silicatos;
- Evidência de dolomitização de quartzo-itabiritos e transformação da dolomita em hematita;
- Evidência de talcificação;
- Microestruturas indicativas de mobilização sintectônica do ferro;
- Existência de inclusões fluidas na hematita e
- Existência de veios de hematita cortando o bandamento.

Assim, os itabiritos podem ser classificados pelos seguintes tipos composicionais (Rosière & Chemale Jr., 2000):

- I. Quartzo itabirito: representa o tipo de itabirito mais comum no Quadrilátero Ferrífero, resultante do metamorfismo do jaspelito, originalmente constituído por camadas alternadas de minerais de ferro e jaspe.
- II. Itabirito dolomítico: itabiritos constituídos por bandas alternadas de óxidos de ferro, quartzo e dolomita ferroana.
- III. Itabirito anfibolítico: apresentam como constituintes anfibólios de composição variada como cristais idiomórficos ou hipidiomórficos, sem orientação ou

constituindo uma trama granolepidoblástica a lepidoblástica de cristais orientados segundo o bandamento ou na xistosidade plano-axial.

Ocorrem ainda no Quadrilátero Ferrífero os itabiritos xistosos, também denominados de Fe-tectonitos (Rosière & Chemale Jr, 2000). Essas rochas constituem protomilonitos e milonitos com foliação bem desenvolvida, minerais estirados e outras estruturas típicas de tectonitos. Nos itabiritos xistosos a hematita cresce na forma de palhetas denominadas de especularita, com orientação preferencial cristalográfica e de forma do grão caracterizando uma textura que pode ser próxima a de monocristal. A especularita está diretamente associada à intensidade da deformação em condições dúcteis.

No Quadrilátero Ferrífero os principais corpos de minério de ferro são provenientes dos itabiritos da Formação Cauê, Supergrupo Minas. Segundo Dorr (1964), a rocha mãe de todos os minérios de ferro em Minas Gerais (Brasil) é o itabirito.

Segundo Morris (1985), o termo minério de ferro é comumente utilizado para designar as formações ferríferas em geral. Economicamente, controlado por questões políticas, tecnológicas e de infraestrutura, o termo minério de ferro deve ser utilizado, preponderantemente, referindo-se às rochas que foram, estão sendo, ou serão explotadas comercialmente devido ao seu conteúdo de ferro.

O termo minério de ferro apresentado neste trabalho seguirá a definição proposta por Morris (1985), indicando um material derivado das formações ferríferas bandadas, de importância e significado econômico, no qual o conteúdo de ferro é geralmente maior do que 55%. No caso dos minérios de ferro da reserva da Samarco Mineração, os minérios são tidos como minério de ferro de baixo teor, ou minério de ferro itabirítico ou minério de ferro pobre, pois apresentam teores de ferro menor do que 55%.

3.3 Gênese do minério de ferro

A gênese de um minério consiste na origem e evolução do minério até sua forma atual. Neste processo estão envolvidos todas as alterações sofridas pelo protólito, a partir de sua deposição. Fatores como ambiente de deposição do material, variações

de temperatura e pressão durante o metamorfismo, processos deformacionais e alterações intempéricas são determinantes na gênese do minério (Santos, 2002).

Vários modelos já foram propostos para a gênese do minério de ferro a partir das formações ferríferas bandadas.

Rosière *et al.* (2008) descrevem três estágios de formação hipogênica (sin-tectônicos) de minério relacionados às orogêneses Transamazônica e Brasileira que afetaram o Supergrupo Minas. Estes eventos refletiram em uma grande transformação das formações ferríferas, com corpos de alto teor de Fe, constituído principalmente de óxidos de ferro, substituindo os itabiritos por meio da atuação de processos hipogênicos e, posteriormente, processos supergênicos recentes.

De acordo com os autores, no primeiro estágio fluidos metamórficos teriam lixiviado a SiO₂ e carbonatos e mobilizado o ferro, resultando na formação de corpos de magnetita, veios de óxidos de ferro e corpos de itabiritos ricos em ferro. No segundo estágio, fluidos de baixa temperatura e salinidade oxidaram a magnetita em hematita, gerando minérios porosos e maciços (isotrópicos) de trama granular. A transformação da magnetita em hematita, segundo Lagoeiro (1998), ocorreu através de transformações sintectônicas por mecanismos de dissolução e precipitação. A grande abundância de relictos de magnetita nas formações ferríferas é um indicativo de que esse era o principal óxido presente, anteriormente ao processo de oxidação que afetou toda a formação Cauê, resultando na predominância da hematita (Rosière & Rios, 2004).

No último estágio de formação hipogênica do minério de ferro, Rosière *et al.* (2008) descrevem a formação da hematita tabular e lamelar relacionada à presença de fluidos hidrotermais de alta salinidade, predominante no extremo leste do Quadrilátero Ferrífero.

Em resumo, os processos tectono-metamórficos deram origem aos protominérios itabiríticos compactos/macios, com estrutura característica pela alternância de bandas de óxidos de ferro e bandas silicosas (Dorr, 1969; Chemale Jr. *et al.*, 1987; Toledo *et al.*, 2000; Rosière *et al.*, 2008). Esses processos foram os responsáveis pelo arranjo de estruturas e texturas apresentado pelos itabiritos, com desenvolvimento de várias gerações de óxidos de ferro (Rosière *et al.*, 1993).

Segundo Dorr (1964), no Quadrilátero Ferrífero, em virtude das condições climáticas da região, o intemperismo tem um papel fundamental na geração dos corpos lavráveis

de minério de ferro de alto teor, por meio da lixiviação da SiO_2 de carbonatos por águas superficiais.

Morris (1985) atesta que os principais depósitos de minério de ferro do mundo, derivados de formações ferríferas, foram formados por processos de enriquecimento supergênico. Segundo o autor, o processo envolveu substituição metassomática dos minerais de ganga por óxidos de ferro hidratados, que cristalizaram-se principalmente como goethita.

O processo de enriquecimento supergênico inicia-se nas rochas expostas à superfície, com a hidratação, oxidação e hidrólise dos minerais na zona de oxidação, onde há circulação intensa de água meteórica, o pH é neutro a ácido e o Eh é neutro a oxidante. Os silicatos, mais solúveis do que os óxidos de ferro (Toledo *et. al.*, 2000), são parcialmente solubilizados e carreados para fora do sistema, enquanto que as substâncias insolúveis permanecem e passam a se concentrar residualmente (Morris, 1985).

Próximo à superfície, o intemperismo é responsável também pela oxidação e hidratação da magnetita e, em menor proporção, da hematita, formando uma crosta laterítica (canga) constituída predominantemente de goethita. Essa crosta ferruginosa pode variar de alguns metros até dezenas de metros e tem um papel importante no processo supergênico, pois protege as formações ferríferas subjacentes da oxidação e hidratação, permitindo assim maior efetividade do processo de lixiviação da SiO_2 (Rosière & Chemale Jr., 2000).

Como consequência dos processos associados ao intemperismo, ocorre o abrandamento da rocha sã pela dissolução e transporte dos materiais associados às bandas lixiviáveis e simultâneo colapso das bandas residuais. Em outras palavras, o processo de enriquecimento supergênico é o responsável pela formação dos diversos minérios de ferro macios e friáveis. Chemale Jr. *et al.* (1987) idealizaram o perfil de intemperismo do Quadrilátero Ferrífero, apresentando do topo para a base: Canga – Hematita Friável – Itabirito Brando – Itabirito Friável – Itabirito Compacto.

Ribeiro (2003) demonstra que a transição do itabirito compacto para o hematitito friável envolve lixiviação quase total do quartzo, ou carbonato em solução, e redução do volume original da ordem de 30 a 40%. O hematitito friável resultante tem porosidade entre 30 e 40% e densidade entre $3,2 \text{ t/m}^3$ e $3,6 \text{ t/m}^3$, com teor de ferro da ordem de 66%.

Guild (1957) propõe que os itabiritos friáveis do Quadrilátero Ferrífero foram formados por desagregação dos itabiritos compactos. A dissolução dos carbonatos presentes nas formações ferríferas bandadas forneceu condições alcalinas favoráveis para dissolver mais facilmente o quartzo.

Dorr (1964) afirma que a desagregação do itabirito compacto por dissolução do quartzo e de outros constituintes solúveis, causou o enriquecimento residual do ferro, formando itabiritos enriquecidos com menores proporções de hidróxidos de ferro. A continuidade do intemperismo, a remoção de quartzo e a parcial substituição da magnetita e da hematita por goethita secundária, produziram o minério com teor intermediário, e nos estágios mais avançados do processo de alteração, em superfície, houve a formação da canga. As bandas com hematita e magnetita são parcialmente lixiviadas e o ferro é oxidado inicialmente a partir do Fe^{2+} e precipitado como hidróxido de ferro insolúvel, goethita.

Babour (1970) *apud* Ribeiro (2003) relata que a oxidação da magnetita e a alteração do itabirito decrescem com a profundidade.

No Quadrilátero Ferrífero, as jazidas com gênese associada aos processos supergênicos apresentam característica de queda do teor de ferro e aumento da compacidade do minério em profundidade, onde o processo de intemperismo é menos atuante.

3.4 Minérios e minerais do Complexo Alegria - Samarco Mineração

As jazidas pesquisadas e lavradas pela Samarco estão localizadas na porção leste do Quadrilátero Ferrífero, a sul da Serra do Caraça, abrangendo os municípios de Mariana e Ouro Preto, MG (figura 3.3).

Geologicamente, a reserva da Samarco está presente no contexto do Complexo Alegria, sendo parte integrante da estrutura tectônica do Sinclinal Alegria.

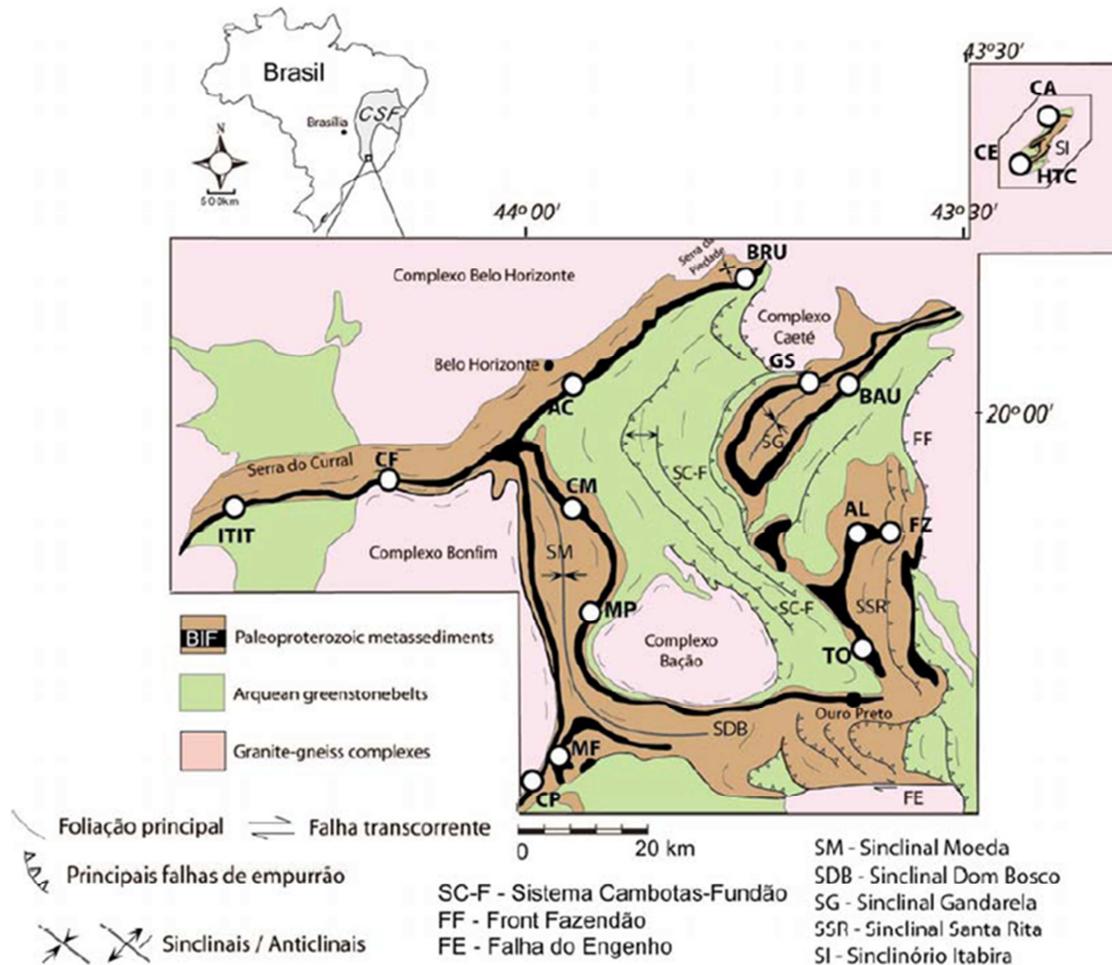


Figura 3.3 – Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Dorr, 1969; extraído de Mendes 2011) com destaque para localização de algumas das principais jazidas de minério de ferro. AL – Alegria; ITIT – Itatiaiuçu; CF – Córrego do Feijão; AC – Águas Claras; CM – Capitão do Mato; MP – Mina do Pico; MF – Mina de Fábrica; CP – Casa de Pedra; BRU – Brumafer; GS – Gongo Soco; BAU – Baú; FZ – Fazendão; TO – Timbompeba; CE – Conceição; HTC – Itabira e CA – Cauê.

De acordo com Hasui *et al.* (1994), a estrutura sinformal de Alegria originou-se a partir de movimentos diferenciais de massa de sentido leste-nordeste para oeste-noroeste, em regime dúctil, durante um evento regional de cavalgamento.

Segundo Januzzi & Alkmim (1989) e Chemale Jr. *et al.* (1991) a estruturação desta região ocorreu por falhas de empurrão de traço curvo que rotacionaram e comprimiram os metassedimentos do Supergrupo Minas no Sinclinal Santa Rita, contra a porção sudeste do maciço quartzítico do Caraça. Estruturas em rampas frontais de cavalgamento provocaram o adelgaçamento do Sinclinal Santa Rita contra o maciço do caraça (Silva e Gibotti, 1989; Chemale Jr. *et al.*, 1991; Castro Alves, 1991; *apud* Rosière *et al.*, 1993).

A gênese dos minérios de Alegria é atribuída aos processos tectono-metamórficos sobre os sedimentos ferríferos originais superpostos por processos de enriquecimento supergênicos que ocorreram no Cenozóico (Hasui *et al.*, 1994; Costa *et al.*, 1998).

Litologicamente, na região de Alegria afloram quase todas as unidades do Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi, representados pelas formações Moeda, Batatal, Cauê e grupos Piracicaba, Sabará e Itacolomi. Estão presentes ainda diques e soleiras de rochas básicas e crostas lateríticas e depósitos de tálus.

A formação Cauê é constituída por formações ferríferas bandadas metamorfizadas. O ambiente deposicional dos sedimentos ferríferos originais pode ser atribuído a uma grande plataforma continental, onde a precipitação química ocorreu em grandes períodos transgressivos, ocorrendo deposição de sedimentos de fácies óxidos, silicato e carbonato (Rocha, 2008).

As transformações mineralógicas e texturais que os itabiritos do Complexo Alegria foram submetidas são resultados dos processos tectono-metamórficos sobre os sedimentos ferríferos originais associados aos processos de enriquecimento supergênicos durante o Neógeno, além das variações condicionadas à deposição da formação ferrífera. Ao final, tem-se como resultado de todos esses processos uma imensa variedade de tipos de minérios e rochas associadas (Rocha, 2008).

De acordo com Rocha *et al.* (2012) os principais óxidos e oxi-hidróxidos de ferro presentes nos itabiritos da Mina de Alegria são, em ordem crescente:

- 1) Hematita: que ocorre principalmente sob a forma de martita e em menor proporção sob a forma lamelar ou especular;
- 2) Goethita: presente sob diversas formas, botrioidal, maciça, fibrosa (pseudomórfica de anfibólios) e terrosa;
- 3) Magnetita: normalmente encontra-se em processo de martitização e apresenta-se em menor proporção do que os demais.

O quartzo é o principal mineral de ganga, além dos argilominerais (caulinita e gibbsita) e traços de mica, que ocorrem em pequenas proporções (Rocha *et al.* 2012).

A goethita terrosa (“limonita”) e os argilominerais constituem um grupo de constituintes secundários, que, apesar de menos expressivos, quando comparados aos principais constituintes do minério, requerem uma atenção especial pelos efeitos nocivos que podem causar no tratamento do minério, gerando lamas e arrastando consigo impurezas diversas, das quais as mais críticas são o fósforo e o alumínio (Rocha & Brandão, 1996).

3.4.1 Hematita

A hematita cristaliza-se no sistema hexagonal, classe trigonal-escalenoédrica. Apresenta dureza entre 5,5 e 6,5 com densidade entre 4,9 e 5,3, em cristais puros 5,2. Os cristais são de morfologia muito diferentes, podendo estar sob a forma de placas delgadas agrupadas em forma de rosetas, mais raramente podem ser nitidamente romboédricos, usualmente terrosa, ou em configurações botrioidais a reniformes. Apresentam brilho metálico e cor azul do aço, as variedades terrosas são opacas. A cor do traço é vermelho sangue (Santos, 2002; Costa, 2005; Rocha, 2008).

A variação cristalina com brilho metálico é conhecida como hematita especular ou especularita e estrutura lamelar como hematita micácea (Santos, 2002).

A martita ou hematita martítica é o termo empregado à hematita que ocorre em cristais octaédricos ou dodecaédricos, pseudomórficos da magnetita (Santos, 2002).

Ao microscópio de luz refletida, a hematita apresenta-se fortemente brilhante e branca, pura quando não comparada a outros minerais, ou em tom levemente cinzento. É anisotrópica e com o pleocroísmo de reflexão fraco, desde branco a azul acinzentado pálido. Refletividade moderada (22% a 28% no ar) e pode apresentar reflexões internas de cor vermelha viva (Santos, 2002; Rocha, 2008).

As propriedades estruturais da hematita são fortemente dependentes das condições de formação. Geralmente, existe uma forte tendência ao idiomorfismo. A hematita formada a altas temperaturas é desenvolvida sob a forma de cristais robustos. As hematitas geradas em locais de contato metassomático são, com frequência, aproximadamente isométricas. A hematita é geralmente tabular e muitas vezes

desenvolve-se sob a forma de lâminas delgadas, facilmente onduladas durante o processo tectônico (Ramdohr, 1980 *apud* Rocha, 2008).

Em região de mais alto grau metamórfico, como é o caso do leste do Quadrilátero Ferrífero (Rosière & Chemale Jr., 2000), as hematitas tendem a recrystaliza-se em grãos mais alongados, uma vez que o cristal de hematita cresce com seu eixo maior paralelo à direção de maior extensão e o menor eixo paralelo à direção de maior compressão, resultado em cristais tabulares e lamelares de hematita (Mendes, 2011).

Sob condições supergênicas, a hematita parece ser o componente mais estável das formações ferríferas bandadas (Morris, 1985).

Processos metamórficos ou supergênicos atuantes na gênese do minério foram responsáveis pela geração da hematita martítica, a partir da magnetita. A hematita martítica metamórfica ocorre próximo às zonas de alta deformação, onde a migração de fluidos permitiu a difusão de átomos de oxigênio segundo planos do retículo cristalino da magnetita (Rocha, 2008). A hematita martítica de origem supergênica é gerada a partir da oxidação da magnetita, sob diferentes graus de alteração e, conseqüentemente, diferentes graus de porosidade (Santos, 2002; Rocha, 2008).

Na jazida de Alegria, a hematita, sob suas diversas gerações e formas, é o mineral mais abundante, ocorrendo em cristais octaédricos pseudomorfos da magnetita (martita), em cristais lamelares ou placóides (especularita) e em concreções e preenchimento de cavidades (Rocha, 2008).

A hematita especular mais expressiva corresponde a cristais hipidiomórficos a idiomórficos de dimensões variando entre 0,02mm e 0,3mm, orientados paralelamente ou subparalelamente ao plano de foliação principal, definindo uma trama lepidoblástica ou milonítica, associada a zonas de alta deformação (Rocha, 2008).

3.4.2 Magnetita

A magnetita cristaliza-se no sistema isométrico, classe hexaoctaédrica. É fortemente magnética, opaca, com brilho submetálico preto do ferro, com tons variados de marrom ou cinza, azul do aço em partes intemperizadas. Usualmente é maciça granular, com granulação grossa ou fina. Apresenta dureza entre 5,5 e 6,0 e densidade de 5,2 (Santos, 2002; Costa, 2005; Rocha, 2008).

É composta essencialmente por 72,4% de Fe e 27,6% de O. Entretanto, algumas análises podem mostrar consideráveis porcentagem de Mg e Mn^{2+} substituindo o Fe^{2+} e Al, Cr, Mn^{3+} e Ti^{4+} substituindo o Fe^{3+} (Santos, 2002).

A magnetita, quando comparada à hematita, é mais estável a alta temperatura e baixa pressão (Santos, 2002; Rocha, 2008).

Ao microscópio de luz refletida, a magnetita apresenta-se com reflectância moderada, de cor cinza, com tonalidades variáveis de marrom claro (Rocha, 2008).

Nos minérios da mina de Alegria, a magnetita é o óxido de ferro original, o mais antigo, e o menos expressivo dentro da reserva. Ocorre formando agregados com outros minerais de ferro, em bandas que se intercalam com bandas quartzosas. Os cristais de magnetita encontram-se, em sua maioria, martitizados apresentando estrutura em treliça (Rocha, 2008).

Para o Complexo Alegria, o termo magnetita refere-se a magnetita não estequiométrica, estudada por Morris (1983) nos minérios de ferro da Província de Hamersley, na Austrália. Na literatura é conhecida pela denominação de kenomagnetita (Rocha, 2008).

3.4.3 Goethita

A goethita cristaliza-se no sistema ortorrômbico, classe bipiramidal, com seus cristais na forma acicular, maciça, reniforme, estalactítica e em agregados fibrosos radiais. Apresenta dureza entre 5 e 5,5 e densidade de 4,3. Tem brilho adamantino a opaco, podendo ser sedoso em algumas variedades finamente escamosas ou fibrosas. Sua coloração pode variar de castanho amarelada a castanho escuro e possui traço amarelo (Rocha, 2008).

Em microscópio de luz refletida apresenta coloração cinzenta, com anisotropia média e em seções delgadas é amarela a vermelha alaranjada (Santos, 2002).

A goethita é um mineral tipicamente formado sob condições oxidantes como produto de intemperismo dos óxidos de ferro. A goethita é o principal formador dos chamados “chapéu de ferro”, cobertura de canga sobre os depósitos de formações ferríferas (Santos, 2002).

Na jazida de Alegria, a goethita é um dos minerais mais abundantes, junto com a hematita (Rocha, 2008). Pode apresentar diversas feições, tais como botrioidal, maciça, porosa, terrosa e fibrosa (Rocha *et al.*, 2011).

Nos itabiritos a goethita substitui o quartzo, a magnetita e a martita. A geração principal da goethita e, nitidamente a mais antiga, tem como característica principal a goethita substituindo o quartzo, óxidos e silicatos de ferro, sem alterar a estrutura original dos itabiritos. A substituição ocorre preferencialmente no centro dos cristais de magnetita, preservando lamelas de hematita martítica, resultado em uma textura esquelética, muito comum na jazida de Alegria (Rocha, 2008).

Diferentes fases de goethita podem ocorrer como concreções ou crostas secundárias, apresentando estruturas diversas, fibrorradiada, coliforme, maciça e criptocristalina, originadas pela precipitação de hidróxidos de ferro ao longo de descontinuidades e espaços vazios (Veríssimo, 1999).

A goethita acicular desenvolve-se perpendicularmente aos cristais primários, que pode ser hematita ou quartzo e é formada por redistribuição do ferro carreado, o qual promove a cimentação das partículas (Morris, 1985).

A goethita fibrosa é resultante da alteração de anfibólios ferríferos da série cummingtonita/gruneria preexistentes, e algum quartzo, originando as goethitas pseudomórficas de anfibólios (Rocha *et al.*, 2009).

Os elementos minoritários do minério de ferro, Al_2O_3 , SiO_2 e P (fósforo) encontra-se principalmente associados à goethita, em todas as suas feições morfológicas, principalmente a fibrosa e a botrioidal, seguida a maciça (Brandão *et al.*, 2012).

3.5 Tipologia dos minérios de ferro do Complexo Alegria – Samarco Mineração

A tipologia do minério de ferro adotada pelas diversas mineradoras de todo o mundo é consideravelmente variável dependendo da complexidade e particularidades de cada jazida, do processo produtivo de cada indústria, do nível de conhecimento que cada empresa possui de seus depósitos e da maturidade em um sistema de geometalurgia. O histórico do desenvolvimento da tipologia do minério de ferro da Samarco Mineração retrata este cenário.

O modelo geológico-tipológico atualmente concebido na Samarco é o alicerce para um modelo geometalúrgico, constituindo em uma ferramenta básica para a estimativa de reserva e um instrumento de previsibilidade desde o planejamento de lavra até o controle integrado de qualidade dos concentrados e pelotas produzidas (Rodrigues *et al.*, 2014).

O modelo geológico-tipológico é fundamentado pela composição mineralógica dos itabiritos para diferenciação e definição dos tipos, pois oferecem características intrínsecas, químicas e físicas, a cada um deles, e remetem a natureza e intensidade dos processos geológicos atuantes na gênese do minério. Esses modelos foram estabelecidos utilizando a filosofia de diferenciação dos minérios segundo o seu desempenho nas principais etapas dos processos de concentração e pelotização (Costa *et al.*, 1998).

Os tipos de minério são definidos e diferenciados em função de sua assembleia mineralógica, que pode se constituir por um, dois, três ou até quatro espécies mineralógicas. A nomenclatura adotada reflete a composição mineralógica considerando a participação percentual dos minerais de ferro em ordem decrescente, sendo a hematita especular, martita, goethita e magnetita (Costa *et al.*, 1998).

Assim, de forma geral, os principais tipos modelados na reserva da Samarco, descritos em Rocha (2008), são:

- **Itabirito martítico (IM)**

Macroscopicamente, esse tipo normalmente apresenta coloração cinza escuro fosca, podendo apresentar intercalações de lâminas avermelhadas (hematita alterada). Caracteriza-se pela presença de martita como mineral-minério predominante, proveniente da alteração da magnetita. A goethita, especularita e a magnetita estão presentes em porcentagens inferiores a 15%. O mineral de ganga é principalmente o quartzo. Usualmente é friável, podendo localmente estar pulverulento. Encontra-se presente em todas as áreas de Alegria.

- **Itabirito martítico-especularítico (IME)**

Apresenta coloração variando de cinza a cinza azulada brilhante. Caracteriza-se pela presença de martita e specularita sendo a primeira mais abundante que a segunda. Normalmente a goethita está presente em porcentagens inferiores a 10% e a magnetita está sob a forma de traços. O mineral da ganga é principalmente o quartzo, podendo conter quantidades pequenas de caulinita. É um tipo muito expressivo na mina de Alegria Sul estando normalmente friável mas também em corpos semicompactos.

- **Itabirito specularítico-martítico (IEM)**

Tipo de itabirito de coloração cinza azulada brilhante. Macroscopicamente diferencia-se do IME, descrito anteriormente, pelo brilho um pouco mais intenso indicando a maior abundância da specularita relativamente à martita. É o inverso do itabirito martítico-especularítico. Neste caso, caracteriza-se pela presença de specularita e martita, sendo a primeira mais abundante que a segunda. Normalmente a goethita está presente em porcentagens inferiores a 10% e a magnetita está sob a forma de traços. O mineral da ganga é principalmente o quartzo e, como os itabiritos IME, pode apresentar quantidades pequenas de caulinita. Está presente em praticamente todas as áreas de Alegria. Apresenta-se friável ou em corpos semicompactos.

- **Itabirito specularítico-goethítico (IEG)**

Apresenta coloração cinza amarronzada um pouco brilhante. É constituído de specularita e goethita. A martita apresenta-se em quantidade inferior a 15%. Em algumas amostras foi constatada a presença significativa de magnetita (entre 15% e 40%). Apresenta quartzo como principal mineral da ganga.

- **Itabirito martítico-especularítico-goethítico (IMEG)**

Sua coloração é cinza um pouco amarronzada. Diferentemente dos outros tipos, este itabirito é constituído pelos três minerais: specularita, martita e goethita. Os três constituintes mineralógicos apresentam-se em quantidades semelhantes. O quartzo é o principal mineral da ganga. É um tipo presente em Alegria Norte.

- **Itabirito especularítico (IE)**

Trata-se de um tipo predominantemente especularítico de coloração azul brilhante. A especularita está presente em quantidades superiores a 75%. Os outros 25% restantes são constituídos por martita e goethita. O mineral da ganga é principalmente o quartzo, podendo conter quantidades variáveis de caulinita.

- **Itabirito anfibolítico (IA)**

É um tipo abundante em todas as minas e é reconhecido pela presença de anfibólios alterados a goethita e, menos frequentemente, a quartzo, além da sua coloração típica castanha (ocre) acinzentada. Além dos pseudomorfos de anfibólio, podem estar presentes ainda martita, goethita botrioidal, goethita terrosa, especularita e magnetita. O principal mineral da ganga é o quartzo.

A goethita (pseudomorfa + botrioidal + terrosa) e a martita são os minerais essenciais desta rocha. Ora é a goethita o mineral predominante, ora é a martita. Tanto a especularita quanto a magnetita, estão presentes em menor proporção.

Normalmente, os itabiritos anfibolíticos apresentam altos teores de P e Al (reportado como Al_2O_3). Por terem a goethita como um dos principais minerais, apresentam também um alto grau de PPC (perda por calcinação). Uma vez que até o presente momento não foram identificados minerais portadores de fósforo, como é o caso dos fosfatos, a presença do P está associada principalmente aos minerais hidratados de ferro (goethita). Isso foi determinado por Rabelo (1994) que estudou a localização desse elemento nos minérios de ferro da Mina de Alegria Norte e posteriormente, comprovado por Souza Junior (1994) em seus estudos nos itabiritos anfibolíticos de Alegria. Ambos utilizaram, principalmente, a microscopia ótica e a microscopia eletrônica de varredura com microanalisador EDS para auxiliar na localização desse fósforo. O mesmo pode ser dito do alumínio, quando não são observados minerais portadores deste elemento (i.e. caulinita e mica) (Rocha, 1997).

Os silicatos de ferro da série cummingtonita-grunerita, pseudomorfizados para goethita, representam o mineral dominante dos itabiritos anfibolíticos. O hábito fibroso e acicular bem desenvolvido, assim como o alto conteúdo em ferro e baixo em alumínio, sugerem tratar-se do membro final rico em ferro (teores da ordem de 70 a 90%) – a grunerita.

Até recentemente, não havia sido registrada a presença de anfíbólio inalterado (relictos) nos itabiritos anfibolíticos da Mina de Alegria. Somente a partir de 2005, quando as campanhas de sondagem atingiram regiões mais profundas das rochas pesquisadas, é que se começou a encontrar itabiritos esverdeados, que após serem analisados, foram caracterizados como itabiritos anfibolíticos frescos.

Souza Junior (1994) realizou uma pesquisa de mestrado nos minérios de ferro itabiríticos anfibolíticos de Alegria e determinou que esses são compostos basicamente de goethita e martita porosa. Os anfibólios estão alterados e apresentam-se como goethita pseudomórfica de anfíbólio, que está acicular, geralmente presente como agregados radiais e mostram-se associados formando partículas em forma de “farpas”.

Rocha (2008) caracterizou os itabiritos anfibolíticos da Mina de Alegria a partir de estudos mineralógicos e microestruturais. De acordo com a autora, a composição mineralógica principal dos itabiritos anfibolíticos tem a goethita e a hematita martítica como principais minerais de ferro. A magnetita está presente em baixas proporções e a hematita lamelar é praticamente ausente. O quartzo é o principal mineral de ganga.

A goethita ocorre em suas formas botrioidal, maciça, pseudomorfos de anfíbólio, produto de alteração das magnetitas e terrosa. As martitas estão normalmente subédricas e usualmente exibem a típica textura de treliça apresentando variados graus de porosidade (Rocha, 2008).

A suposição de que a presença dos elementos traços Ca, Na e Mg na estrutura das goethitas era um forte indicativo da existência anterior de anfibólios e carbonatos que contivessem esses elementos em sua estrutura, fica fortificada pela presença dos itabiritos anfibolíticos frescos em Alegria. Esses itabiritos têm coloração esverdeada, contém os anfibólios riebeckita (sódico-férrica) e/ou grunerita (férrica) com habitus fibroso, que também estão associados com a ankerita (carbonato de Fe-Ca-Mg), com a magnetita, hematita e com o quartzo (Rocha, 2008).

A associação mineralógica encontrada nos itabiritos anfibolíticos frescos, anfibólios, óxido de ferro, quartzo e carbonato, vem a corroborar a origem atribuída a eles, formações ferríferas da fácies silicato ou óxido-silicato, contendo intercalações e impurezas carbonáticas (Rocha, 2008).

- **Itabirito martítico-goethítico (IMG)**

Apresenta coloração castanha a castanha avermelhada. Caracteriza-se pela presença de goethita e martita como minerais predominantes. Os outros minerais (especularita e magnetita) estão presentes em proporções inferiores a 15%.

- **Itabirito goethítico (IG)**

Esta rocha é menos expressiva nas jazidas e apresenta coloração marrom. Seu mineral mais abundante é a goethita (botrioidal e terrosa). Está invariavelmente muito alterada, friável e muito argilosa (goethita).

- **Itabirito magnetítico (IMAG)**

Esta rocha está presente localmente e é pouco expressiva. Sua coloração é cinza e o mineral mais abundante é a magnetita.

Para classificação dos minérios quanto à compacidade, o planejamento de mina e a equipe de Geologia da Samarco utilizam de um critério baseado no retido mássico acumulado na malha de 3/8" (9,4mm), de forma a orientar os planos de desmonte por detonação. Desta forma, os minérios são classificados como Compactos quando o retido em 3/8" é maior do que 80%, como semcompactos quando o retido em 3/8" é menor do que 80% e maior do que 60%, e como Friáveis quando o retido em 3/8" for menor do que 60% (Rodrigues *et al.*, 2014). Nas fotos dos furos de sonda apresentadas na figura 3.4 é possível notar a diferença entre os minérios quanto à compacidade.

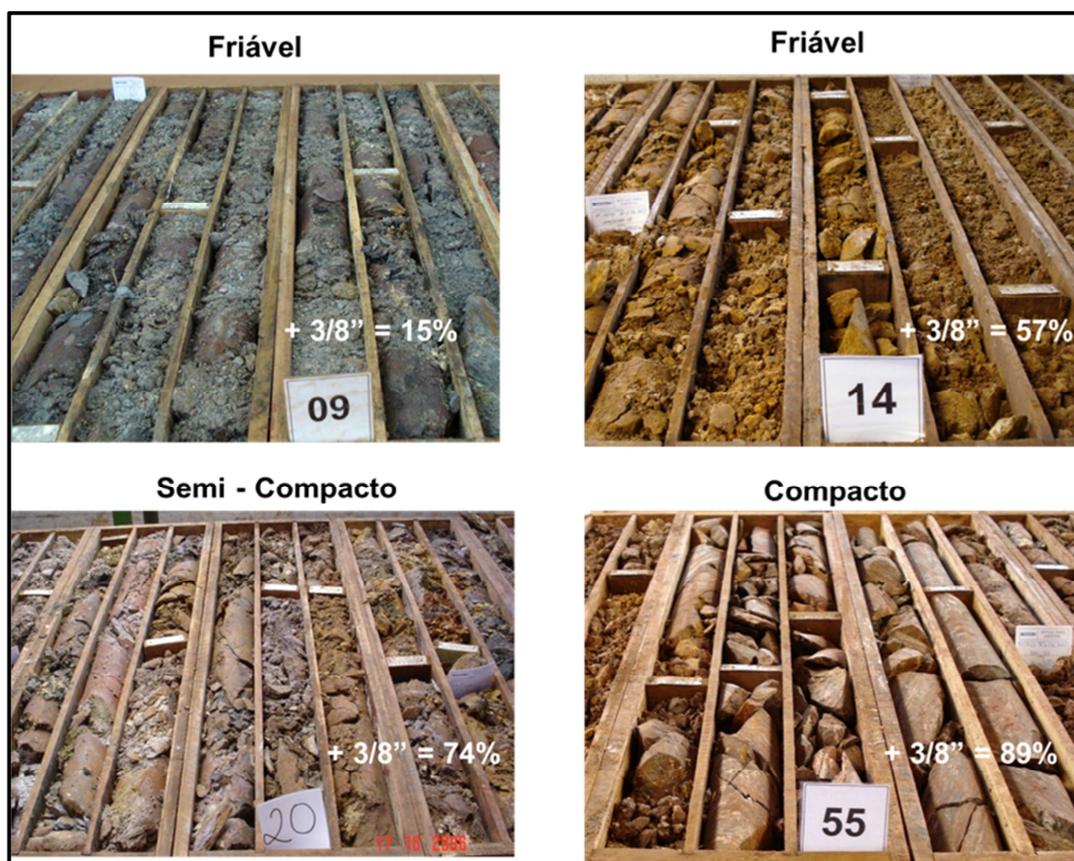


Figura 3.4 – Fotos de furos de sonda de diferentes compacidades, baseado no retido em 3/8" (Rodrigues *et al.*, 2014).

3.6 Processo produtivo da Samarco Mineração

A Samarco Mineração S.A é uma empresa brasileira, com controle acionário em partes iguais entre BHP Billiton e Vale, com mais de 36 anos de trajetória e atuação no mercado de pelotas e finos de minério de ferro. De acordo com o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, é a décima primeira maior exportadora do Brasil e segunda maior no mercado transoceânico de pelotas de minério de ferro. Fornece produtos de alto valor agregado para a indústria siderúrgica mundial, incluindo pelotas para redução direta e para alto-forno (Samarco, 2013).

O processo produtivo da Samarco está distribuído em dois estados, Minas Gerais e Espírito Santo, contemplando todo o ciclo produtivo das pelotas de minério de ferro, da extração à pelletização, ao embarque para exportação.

No ano de 2014 a Samarco concluiu o Projeto Quarta Pelotização, incorporando às suas operações um terceiro concentrador, uma terceira linha de mineroduto e uma quarta usina de pelotização, além de grandes ampliações e adequações nas áreas de mina e porto. Desta forma, a capacidade anual de produção alcançou um patamar de 30,5 milhões de toneladas de pelotas de minério de ferro, um aumento de 37% de produção quando comparado aos 22,25 milhões de toneladas produzidas até então (Samarco, 2013).

Em Minas Gerais, municípios de Mariana e Ouro Preto, encontra-se a unidade industrial de Germano, que compreende a lavra e beneficiamento do minério e o início do transporte do concentrado produzido.

No Espírito Santo, município de Anchieta, está instalada a unidade industrial de Ponta UBU, com operações de preparação da polpa, pelotização, estocagem e embarque de pelotas de minério de ferro e pellet feed para exportação.

O concentrado produzido é transportado, em forma de polpa, por três minerodutos com cerca de 398Km de extensão da unidade de Germano à unidade de Ponta UBU.

A figura 3.5 mostra um fluxograma esquemático do processo produtivo da Samarco.

A Samarco lava e beneficia minérios itabiríticos de baixo teor de ferro, provenientes das minas de Alegria Norte e Alegria Sul, inseridas no contexto geológico do Complexo Alegria. A extração do minério de ferro e a remoção do estéril são realizadas em mina a céu aberto por meio de equipamentos móveis de superfície de grande porte. Todo o minério extraído é transportado até os concentradores pelo sistema de correias transportadoras de longa distância. A reserva atual de minério de ferro da Samarco é da ordem de 3 bilhões de toneladas.

O concentrador I da Samarco está em operação há mais de 36 anos e, ao longo deste tempo, passou por diversas modificações de circuito e expansões da capacidade de produção. O concentrador II iniciou suas operações em 2008 e o concentrador III teve o *start up* em 2014. Os três concentradores apresentam particularidades em termos de equipamentos e rotas de processo, com diferentes capacidades de produção, sendo que os concentradores II e III são mais simples e compactos.



Figura 3.5 – Fluxograma esquemático do processo produtivo da Samarco Mineração (Apresentação institucional Samarco)

Em linhas gerais, os concentradores apresentam o seguinte circuito de beneficiamento. O “mix” de minério lavrado nas diversas frentes de lavra provenientes das minas de Alegria Norte e Alegria Sul e mais o minério de Fazendão (minério da Vale adquirido pela Samarco), alimentam os concentradores com um teor médio de fe de 45%.

O minério passa pela primeira etapa de beneficiamento, com a adequação do tamanho das partículas minerais na instalação de peneiramento e britagem, onde os minérios terão sua granulometria reduzida abaixo de 12,5mm.

O minério britado é alimentado em um circuito de moagem, com etapas de moagem pré-primária e moagem primária ou apenas moagem primária, dependendo do concentrador, que visa a adequação da granulometria do minério à etapa de concentração. A classificação do minério moído é feita por ciclones. O overflow dos ciclones primários constitui o produto da etapa de moagem primária, apresentando de 10 a 16% do material com granulometria superior a 0,15mm. Desta forma, obtém-se um grau de liberação das espécies minerais suficiente para o processo de concentração.

Entretanto, o controle do produto da moagem primária sobrepõe as especificações para a liberação, uma vez que a geração de partículas ultrafinas (lamas) nos minérios de Alegria é alta. Por este motivo, faz-se necessário a etapa de deslamagem entre as etapas de moagem e concentração.

A deslamagem do minério é realizado em etapas de ciclonagem. O overflow da deslamagem (lama) é direcionado para os espessadores de lama enquanto que o underflow segue para as etapas de concentração.

O processo de concentração do minério é realizado por flotação catiônica reversa em etapas de flotação convencional utilizando-se células mecânicas, células mecânicas denominadas de *Tank Cells*, e em colunas de flotação.

O concentrado produzido nas duas primeiras etapas de flotação é remoído em uma etapa de moagem secundária com especificação de 88% passante na malha de 0,044mm e superfície específica (Blaine) de $1800 \text{ cm}^2/\text{g} \pm 75 \text{ cm}^2/\text{g}$ para o concentrador I e $1600 \text{ cm}^2/\text{g} \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ para o concentrador II.

O concentrado remoído alimenta as colunas de flotação para a obtenção do concentrado final, que deverá ser espessado a aproximadamente 71% de sólidos e em seguida transferido para os tanques de estocagem do mineroduto.

O rejeito produzido ao longo das etapas de flotação é direcionado para as barragens de rejeito. A água recuperada no overflow dos espessadores do concentrado e de lama é bombeada para o tanque de água de processo.

Detalhes das etapas do processo de beneficiamento dos concentradores da Samarco podem ser encontrados nos trabalhos de Mapa (2006), Batisteli (2007), Turrer (2007), Vieira (2008), Viera (2011), Castro (2012) e Rosa (2013).

Os fluxogramas dos concentradores I, II e III são apresentados nas figuras 3.6, 3.7 e 3.8, respectivamente.

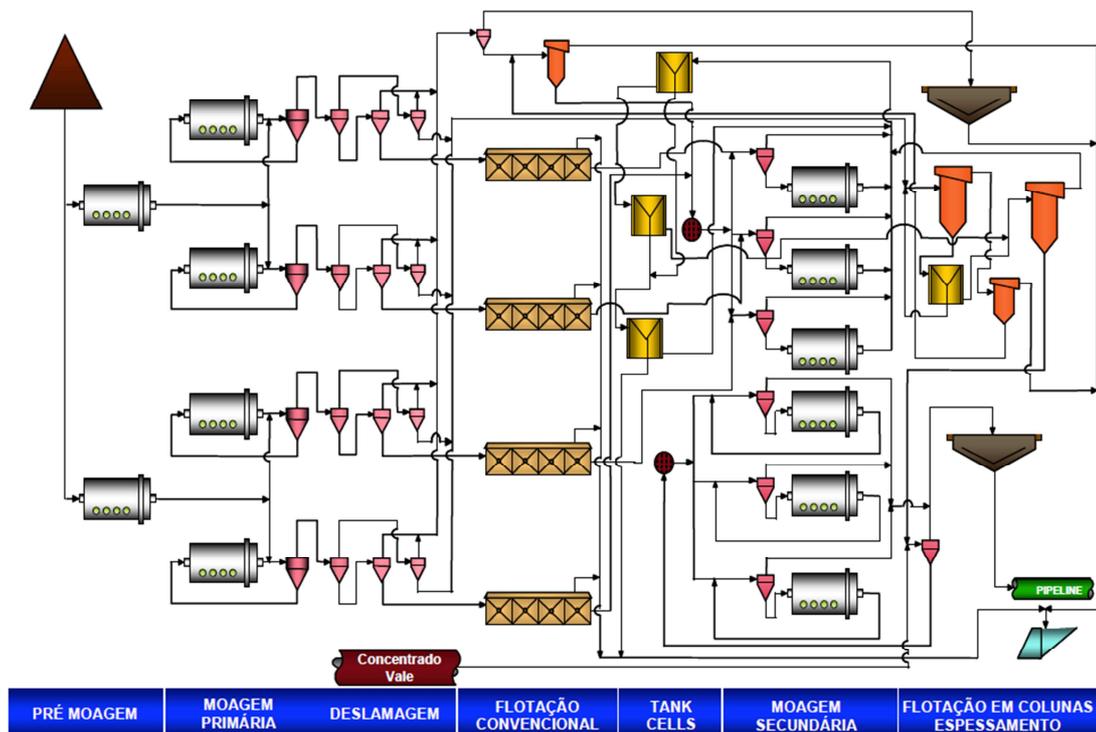


Figura 3.6 – Fluxograma do concentrador I da Samarco. (Rosa, 2013)

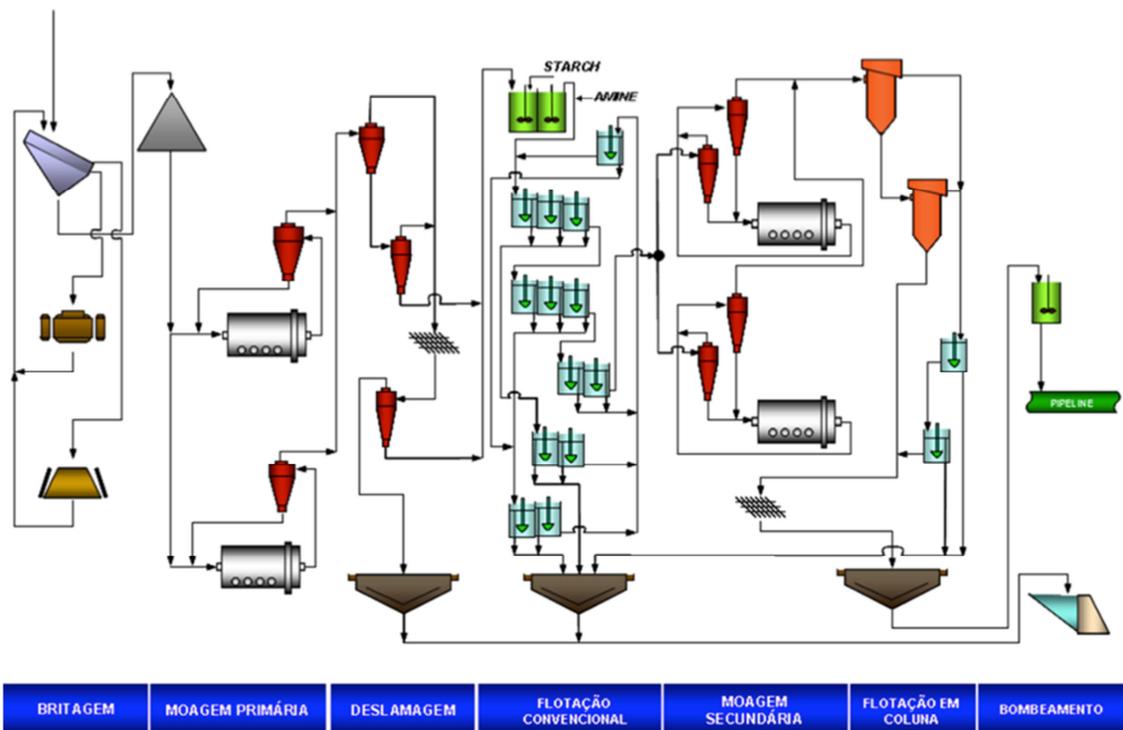


Figura 3.7 – Fluxograma do concentrador II da Samarco. (Vieira, 2011).

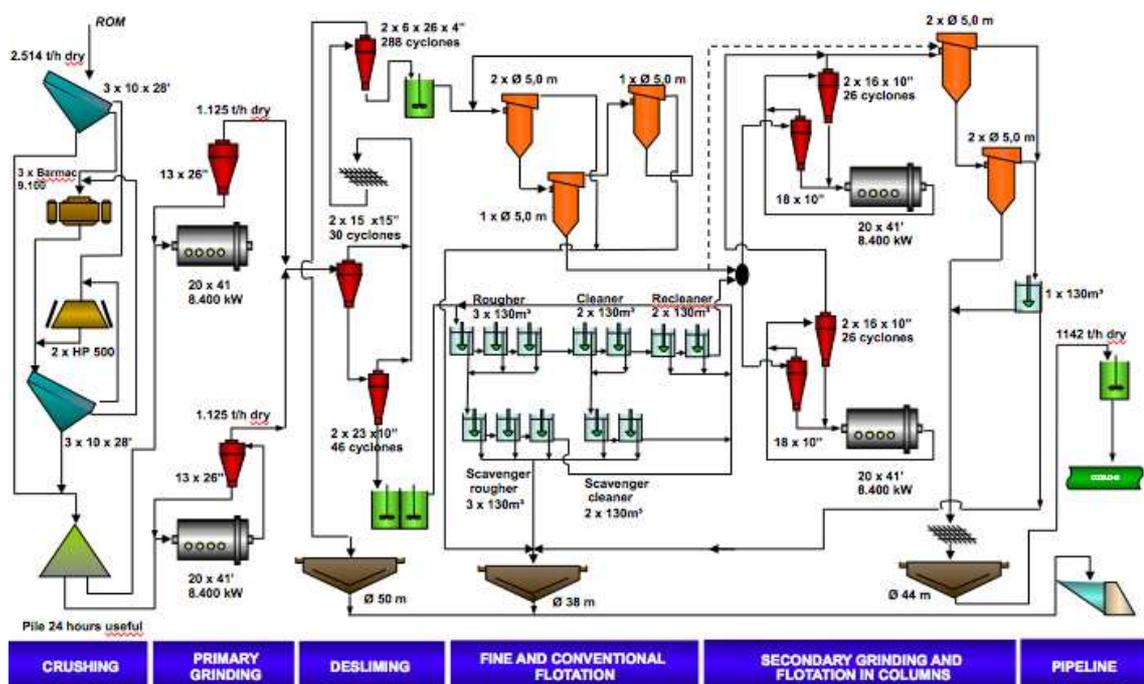


Figura 3.8 – Fluxograma do concentrador III da Samarco.

3.7 Cominuição

No beneficiamento mineral, a cominuição é uma operação de fragmentação que pode ser definida como o processo gradual de redução do tamanho de partículas por meio da aplicação de uma distribuição de esforços mecânicos que compreende forças de abrasão, compressão e impacto (Silva, 2003; Ribeiro, 2004; Rosa, 2013).

As operações de cominuição são, normalmente, estagiadas entre as etapas de britagem e moagem, distintas pela distribuição granulométrica da alimentação e do produto e/ou pela diferença entre os mecanismos de quebra predominantes em cada etapa (Chagas, 2008; Rosa, 2013). Geralmente, a britagem compreende os primeiros estágios de cominuição, sendo responsável pela fragmentação de minérios mais grosseiros. A moagem requer uma alimentação de minérios com menores tamanhos de partículas pois desempenha uma fragmentação mais fina, gerando produtos de menores faixas granulométricas, já nos últimos estágios da cominuição (Rosa, 2013).

Alguns autores destacam os mecanismos atuantes na fratura ou quebra das partículas para cada uma destas etapas de cominuição. Wills (2007) e Chaves e Peres (2009) argumentam que na etapa de britagem os principais mecanismos de quebra estão ligados a forças de compressão e impacto. Já para o processo de moagem, Wills (2007) propõe que a cominuição é promovida por forças predominantemente de abrasão e impacto, enquanto que Chaves e Peres (2009) e Chagas (2008) atestam que os principais mecanismos atuantes na quebra das partículas na moagem são forças de abrasão e arredondamento.

Desta forma, no processamento mineral, segundo definições de Taggart (1945), Beraldo (1987), Herbst (2002) e Wills (2007), os principais objetivos da etapa de cominuição podem ser consolidados da seguinte forma:

- Promover a liberação entre os minerais-minérios e os minerais de ganga, imprescindível para as operações subsequentes de concentração;
- Aumentar a área superficial específica das partículas, de forma que possibilite ou facilite as reações químicas ou físicas, necessárias às operações posteriores de concentração, filtragem e/ou pelotização;
- Adequar a granulometria do minério para etapas posteriores ou para transporte ou segundo especificações exigidas de um determinado produto.

No processo produtivo de pelotas de minério de ferro, é notável que as especificações de qualidade e produção das etapas de concentração, transporte, filtragem e pelotização, dependem fortemente da eficiência do processo de cominuição, principalmente da moagem.

Industrialmente, uma parcela significativa dos custos operacionais de um concentrador é atribuída ao processo de moagem, pelo desgaste excessivo de revestimentos e corpos moedores e, principalmente, pelo elevado consumo energético associado a esta operação (Rosa, 2013).

Além disso, normalmente o processo industrial de cominuição é muito ineficiente em relação ao uso da energia consumida (Silva, 2003; Mazzinghy, 2009). Beraldo (1987) considera que a maior parte da energia consumida nos processos de cominuição é perdida nos equipamentos e, por este motivo, a fração de energia consumida no trabalho útil de moagem é muito pequena.

O processo de cominuição é governado pela intensidade e natureza do esforço aplicado para fragmentação das partículas que, por sua vez, estará condicionada às características intrínsecas do minério. Segundo Silva (2003), a quebra da partícula só ocorrerá se o esforço aplicado for maior do que as forças de coesão desta partícula.

Rosa (2013) conclui que a moagem é tradicionalmente estudada sob o viés da relação entre o consumo de energia e a distribuição granulométrica da alimentação e do produto moído. Assim, associa-se aos parâmetros normalmente utilizados para o controle industrial desta operação (granulometria e superfície específica) um dado para o seu gerenciamento econômico (consumo energético).

3.7.1 Eficiência de moagem

O conceito mais tradicional de eficiência de moagem está ligado ao consumo energético da moagem (kWh) e à granulometria do produto.

Rosa (2013) apresenta uma discussão em relação aos objetivos da busca pela eficiência de um circuito de moagem, proposto por Pryor (1965):

- I. Redução da percentagem dos minerais de interesse nos rejeitos dos processos de concentração;

- II. Redução da participação dos minerais de ganga nos concentrados;
- III. Redução no desgaste dos corpos moedores e dos revestimentos;
- IV. Diminuição do consumo de energia;
- V. Aumento da quantidade de mineral liberado;
- VI. Redução dos custos operacionais.

Segundo a autora, todos os objetivos propostos por Pryor (1965) estão inter-relacionados. A redução do percentual dos minerais de interesse nos rejeitos e dos minerais de ganga no concentrado estão intimamente relacionados com o aumento do grau de liberação. A obtenção de concentrados mais ricos e rejeitos mais pobres consistem no aumento da recuperação do concentrador e, portanto, na redução de custos operacionais. O aumento na quantidade de minério liberado pode ser obtido com o aumento da vazão de alimentação do circuito, reduzindo, assim, a sobremoagem e mantendo-se o controle do tamanho máximo de partículas no produto. Desta forma, ocorre a redução do consumo específico de energia (energia por massa alimentada no moinho) e, proporcionalmente, a redução no desgaste de corpos moedores e de revestimento dos moinhos, conseqüentemente ocorre a diminuição dos custos operacionais.

Diante da argumentação apresentada por Rosa (2013), de fato, os conceitos de eficiência de moagem estão ligados ao consumo energético e à granulometria do produto.

Taggart (1945) define que a eficiência energética de um circuito de moagem é a razão entre a energia consumida pela vazão mássica de material moído em determinada granulometria.

Ao longo dos últimos 150 anos, diferentes modelos empíricos têm sido propostos para correlacionar o consumo de energia da moagem à granulometria. As três leis da cominuição, enunciadas a seguir, constituem os métodos mais amplamente difundidos na literatura.

A primeira lei sobre moagem foi proposta em 1867 por Rittinger. A teoria determina que a energia necessária à cominuição é proporcional à nova área de superfície específica gerada nas partículas. Considerando as partículas por esferas, a área superficial é proporcional ao seu diâmetro. A lei de Rittinger é descrita pela equação:

$$E = k\left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1}\right) \quad (3.1)$$

Onde:

E = energia consumida por unidade de massa alimentada no circuito;

D2 e D1 = diâmetros do produto e da alimentação, respectivamente, tomados normalmente como a percentagem passante na malha de controle do mesmo.

k = constante que define a proporcionalidade entre o consumo específico de energia e o diâmetro das partículas.

Neste modelo, a energia é inversamente proporcional ao diâmetro da partícula do material da alimentação D1 e do produto D2. (Beraldo, 1987)

Em 1885, nos Estados Unidos, Kick elaborou a teoria, denominada como a segunda lei da moagem, onde o requerimento energético é proporcional ao tamanho das partículas cominuídas. Tomando as partículas por esferas, a lei de Kick pode ser traduzida na seguinte equação:

$$E = K \ln \left(\frac{D_1}{D_2} \right) \quad (3.2)$$

Onde:

E = energia consumida por unidade de massa alimentada no circuito;

D2 e D1 = diâmetros do produto e da alimentação, respectivamente, tomados normalmente como a percentagem passante na malha de controle do mesmo.

k = constante que define a proporcionalidade entre o consumo específico de energia e o diâmetro das partículas.

Neste caso, por meio da equação, pode-se afirmar que a energia consumida na moagem é uma relação direta com a redução existente entre a alimentação e o produto.

Fred Bond é o autor da terceira lei da moagem. Postulada em 1952, a teoria é descrita pela seguinte equação:

$$E = K \left(\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right) \quad (3.3)$$

Onde:

E = energia consumida por unidade de massa alimentada no circuito;

D2 e D1 = Refere-se ao D80, ou seja, malha (μm) pela qual passam 80% das partículas no produto e na alimentação, respectivamente.

k = constante que define a proporcionalidade entre o consumo específico de energia e o diâmetro das partículas.

Bond propôs que a constante de proporcionalidade fosse denominado de Work Index ou W_i , atribuindo à constante o valor de $10W_i$. O W_i é intrínseco ao minério e foi definido como a energia necessária para se reduzir o material a partir de um tamanho teórico infinito até um D80 de $100 \mu\text{m}$. Assim, a formulação da lei de Bond para a moagem passa a ser apresentada:

$$E = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right) \quad (3.4)$$

O W_i pode ser determinado experimentalmente a partir de ensaios de laboratório desenvolvidos por Bond. Outra forma de calcular o W_i é a partir dos dados de energia consumida e granulometria de circuitos industriais. Neste caso, o W_i é chamado de W_{io} (Work Index operacional) e sua comparação com o W_i obtido nos ensaios de laboratório é uma medida da eficiência operacional de circuitos industriais (Rowland, 1983).

Segundo von Krüger (2004), dentre os diversos métodos para avaliar a moabilidade de um minério o mais difundido é o método Bond. Porém, este teste é considerado inadequado para o caso de moagem fina. Donda (2003) considera que o método Bond é até hoje o mais utilizado para previsão do consumo de energia na moagem. Ainda segundo o autor, trata-se de um ensaio padronizado, de aplicação mais difundida para moinhos de bolas operando em moagem primária.

Donda e Rosa (2014) afirmam que o método de Bond para previsão do consumo de energia em moinho de bolas é referência no dimensionamento de instalações de moagem. Porém, considerando os minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero, que apresentam relação de redução menor do que 6 e W_i inferior a 7 kWh/st, o método não apresenta a mesma efetividade que aquela comprovada ao longo dos anos para minérios de alta relação de redução e W_i superior a 10 kWh/st.

Além disso, os autores colocam que o teste de determinação de W_i para moinhos de bolas apresenta uma restrição quanto a granulometria de alimentação, considerando o material 100% passante em 3,36mm. As partículas acima desta malha são reduzidas em processos de britagem, apesar de em moinhos industriais a faixa granulométrica de alimentação ser mais ampla, normalmente 100% abaixo de 12,7mm.

Austin *et al.* (1982) *apud* Donda (2003) abordam quatro desvantagens no método Bond para determinação do consumo específico de energia. Primeiramente, o método não inclui a eficiência do classificador e a carga circulante, a mistura de bolas de diferentes diâmetros no moinho, as variações na distribuição de tempo de residência devido à geometria do moinho, os efeitos devido à geometria do revestimento, a reologia da polpa e as variações no nível de polpa no interior do moinho. O segundo ponto diz respeito ao consumo específico de energia determinado no ensaio de Bond não leva em consideração as diferenças devido aos diversos graus de enchimento. A utilização do D80 para caracterizar toda a distribuição granulométrica é o terceiro ponto abordado pelo autor e, finalmente, o fato de não distinguir claramente as causas de operação ineficiente de um moinho é o quarto ponto levantado.

Beraldo (1987) considera o problema mais sério para a aplicação da lei de Bond o fato de não considerar o W_i como função das variáveis de processo. Chaves e Peres (2009) apresenta falhas no método de Bond devido ao seu forte caráter empírico, enquanto que Figueira *et al.* (1995) *apud* Donda (2003) consideram que o método pode levar a resultados muito discrepantes em função das condições de operação, quando estas são muito diferentes das condições usuais.

Donda (2003) discursa que apesar de pertinentes, as críticas não podem ser levadas em consideração em sua totalidade. Sem essas teorias, não seriam efetuados estudos de novas jazidas, estudos geometalúrgicos ou dimensionamento de novas instalações em que a quantidade de amostra disponível é pequena.

Além disso, o autor alerta que as críticas são importantes pois abordam fatores que podem levar a diferenças entre valores obtidos nos testes em laboratório daqueles obtidos industrialmente.

Independentemente das restrições citadas, a praticidade de relacionar a granulometria e o consumo energético ao conceito de eficiência de moagem transformou esta relação em uma abordagem extremamente difundida entre os pesquisadores.

Com foco na simplicidade, efetividade e praticidade, e considerando a necessidade de estudar novas jazidas, dimensionar novas instalações de moagem e de melhorar a performance das instalações existentes, Donda (2003) e Donda e Rosa (2014) apresentaram dois ensaios desenvolvidos para previsão do requerimento energético para moagem primária e para moagem secundária ou (re)moagem, cuja efetividade foi comprovada ao longo de 20 anos de operação dos concentradores da Samarco Mineração.

3.7.2 Ensaios de requerimento energético de moagem

Donda (2003) propôs, desenvolveu e validou um método para previsão do consumo específico de energia em moinhos industriais para a etapa de remoagem. Este método foi uma evolução e uma consequência natural do método já estabelecido, difundido e rotineiramente utilizado desde 1995 nos concentradores de Germano, para previsão do consumo específico de energia dos moinhos industriais para a etapa de moagem.

A teoria busca substituir o tradicional teste proposto por Bond (1952) com objetivo de utilizar uma quantidade mínima possível de amostras, de forma que os ensaios possam ser aplicados a amostras de testemunhos de sondagem, com a realização de ensaios com duração mais curta.

O método desenvolvido por Donda (2003) faz a aplicação da equação de Rowland para o cálculo do consumo de energia em moinhos de pequeno diâmetro, utilizando diferentes tempos de moagens.

$$KWb = 6,3 * D^{0,3} * sen \left(51 - 22 \left(\frac{2,44 - D}{2,44} \right) \right) * (3,2 - 3Vp) * Cs * \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10Cs)}} \right)$$

(3.5)

onde:

KWb: potencia (kW) por tonelada de bolas, no eixo pinhão;

D: Diâmetro interno do moinho (m);

Vp: fração do volume do moinho ocupada pelas bolas;

Cs: fração da velocidade crítica.

A equação de Rowland é utilizada para o cálculo da potência consumida no eixo pinhão do moinho utilizado em laboratório, uma vez que as condições dos ensaios são padronizadas. A tabela abaixo resume estas condições.

Tabela III.1 – Condições do ensaio de moagem. Rosa (2013)

Alimentação	Amostra britada a -9,52mm
Moinho	12" x 12"
Rotação	53,5 rpm (70% da velocidade crítica)
Carga de bolas	30,6Kg escalonada entre 63 a 25mm
Percentagem de enchimento do moinho	30%
% Sólidos da polpa	80%
Massa de amostra por ciclo	5,664Kg

Desta forma, cada tempo de moagem é convertido em consumo específico de energia, a partir de ciclos sucessivos até que se obtenha um produto mais fino do que a especificação para o produto do circuito industrial, que no caso da Samarco é 10% retido na malha de 0,15mm.

Os resultados dos ensaios são apresentados em um gráfico cujas ordenadas são as porcentagens retidas na malha de controle para os diversos produtos, e as abcissas referem-se ao consumo específico de energia para cada ciclo (figura 3.9).

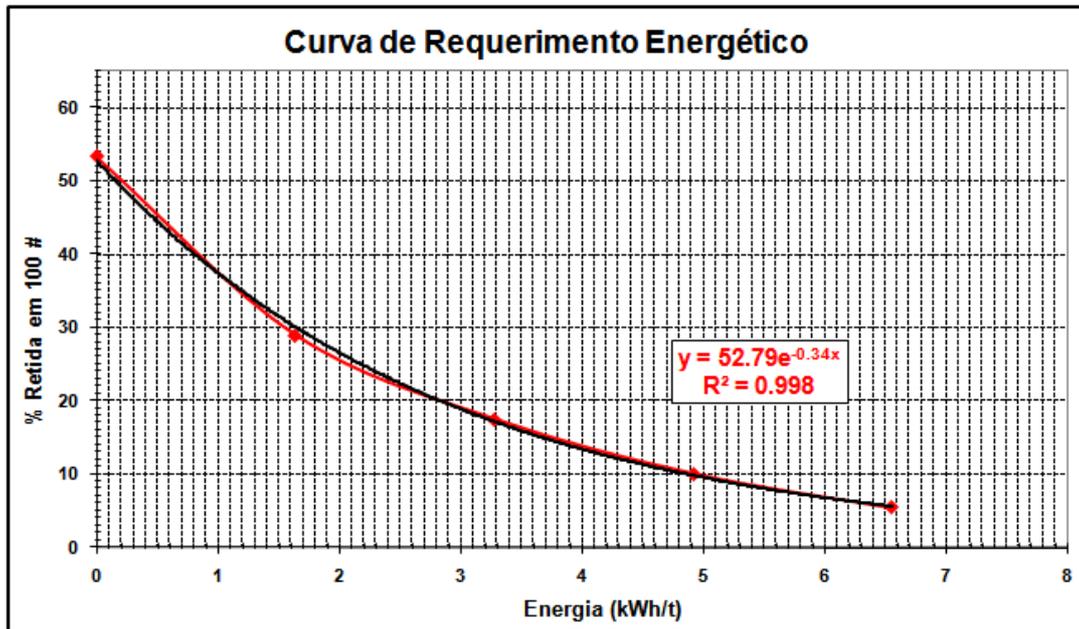


Figura 3.9 – Resultado do ensaio de requerimento energético com a curva exponencial ajustada. O valor de energia é calculado considerando 10% retido em 0,15mm. Rodrigues *et al.* (2014).

3.7.3 Requerimento energético de moagem como previsibilidade do comportamento dos tipos de minérios

Rodrigues, Bonfioli, Mapa e Pinto (2014) conduziram trabalhos na Samarco, uma parceria entre as áreas de geologia e engenharia de processo, com intuito de evoluir na concepção de um modelo geometalúrgico desenvolvendo ferramentas que possibilitem a previsão do comportamento do minério para a etapa de moagem.

De acordo com os autores o ensaio de requerimento energético é a ferramenta que traz a relação direta do comportamento do minério ao conceito de eficiência de moagem, fornecendo subsídios para o controle operacional do circuito de moagem e para o dimensionamento de novas instalações.

O objetivo do trabalho foi inserir nos modelos de blocos de longo e curto prazo o requerimento energético (kWh/t), possibilitando ao planejamento de lavra de curto prazo a adequação do minério à energia de moagem existente e ao planejamento de longo fornecer à Engenharia de Processos recursos para antever a necessidade de

investimento nas usinas existentes e/ou auxiliar no dimensionamento de novas instalações de moagem.

O ensaio de requerimento energético de moagem foi inserido no fluxograma de caracterização das amostras de testemunhos de furos de sonda e nas amostras de frentes de lavra. Inicialmente foi realizado um estudo nas amostras de frentes de lavra para entendimento das relações entre as diversas variáveis do minério com o requerimento energético (Rodrigues *et al.*, 2014).

Após a inserção do ensaio de requerimento energético no fluxograma de caracterização das amostras de testemunhos de sonda, foi composto um banco de dados com cerca de quatrocentas e cinquenta amostras. A partir desse conjunto de dados, foi realizado um estudo estatístico na busca de um modelo matemático de regressão para o cálculo do requerimento energético a partir das variáveis presentes no banco de dados geológico. Primeiramente houve um estudo estatístico básico para a seleção das variáveis mais relevantes no resultado do requerimento energético, orientando-se também pelos resultados obtidos do trabalho investigativo inicial, com as amostras de frentes de lavra. Dentre as variáveis presentes no banco de dados geológico foram previamente selecionadas, como variáveis explicativas, o tempo obtido no teste de DTM (determinação do tempo de moagem), os teores de ferro e PPC do ROM, o valor do retido acumulado na malha de 9,4mm da análise granulométrica do ROM, e os teores de hematita especular e hematita martítica da alimentação da flotação (Rodrigues *et al.*, 2014).

Após todo o trabalho estatístico foi determinada uma equação, compreendo todas as variáveis citadas, para o cálculo do requerimento energético de moagem (figura 3.10). No modelo ajustado 83,9% da variabilidade total do requerimento energético é explicado pelas seis variáveis significativas. A equação de regressão (1) apresentou teste de significância satisfatório com $P\text{-value}=0$ (Rodrigues *et al.*, 2014).

Análise de Regressão

Requerimento Energético (kWh/t) = 3.51 + 0.221*DTM - 0.0538*Fe + 0.517*PPC + 0.0401*3/8" - 0.0281*HE - 0.0211*HM (1)

Predictor	coef	SE coef	T	P
Constant	3.5131	0.6100	5.76	0.000
DTM	0.22137	0.01300	17.03	0.000
Fe	-0.05376	0.01312	-4.10	0.000
PPC	0.51671	0.06962	7.42	0.000
3/8"	0.040092	0.003536	11.34	0.000
HE	-0.028110	0.007258	-3.87	0.000
HM	-0.021111	0.005543	-3.81	0.000

S = 1.59718 R-Sq = 84.2% R-Sq (adj) = 83.9%

Figura 3.10 – Equação para cálculo do requerimento energético de moagem, segundo análise de regressão dado pelo Minitab (Rodrigues *et al.*, 2014).

O modelo matemático ajustado foi validado por meio da análise de resíduos considerando as suposições de normalidade dos dados, variância constante e independência dos dados (figura 3.11).

Depois de definido o modelo matemático, o requerimento energético de moagem foi calculado nos modelos de blocos de longo e curto prazo, a partir das variáveis estimadas. Desta forma, seja no sequenciamento de lavra da reserva ou nos planos de lavra de curto prazo, é reportado o valor de requerimento energético (kWh/t), oferecendo uma resposta direta do comportamento do minério na etapa de moagem. Na figura 3.12 é apresentado o mapa da mina de Alegria Norte conforme valores de requerimento energético do modelo de blocos de curto prazo (Rodrigues *et al.*, 2014).

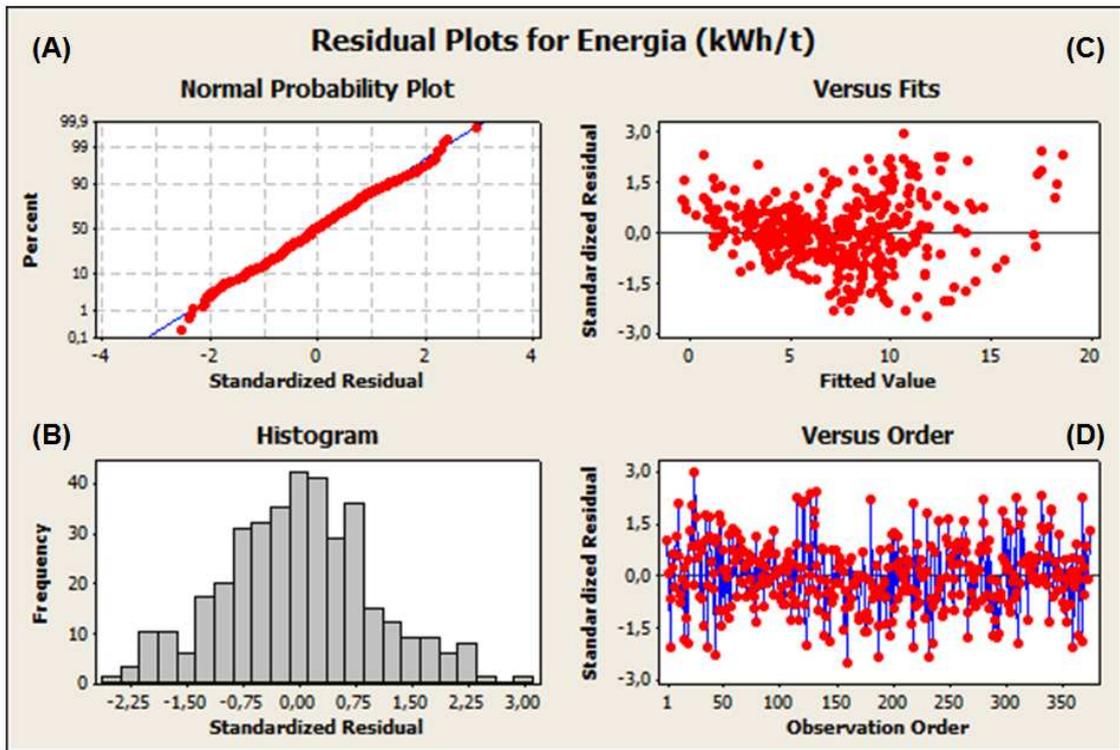


Figura 3.11 - Imagem do Minitab da análise de resíduos pelas suposições de normalidade dos dados, imagem (A) e (B), variância constante, imagem (C), e independência dos dados, imagem (D) (Rodrigues *et al.*, 2014).

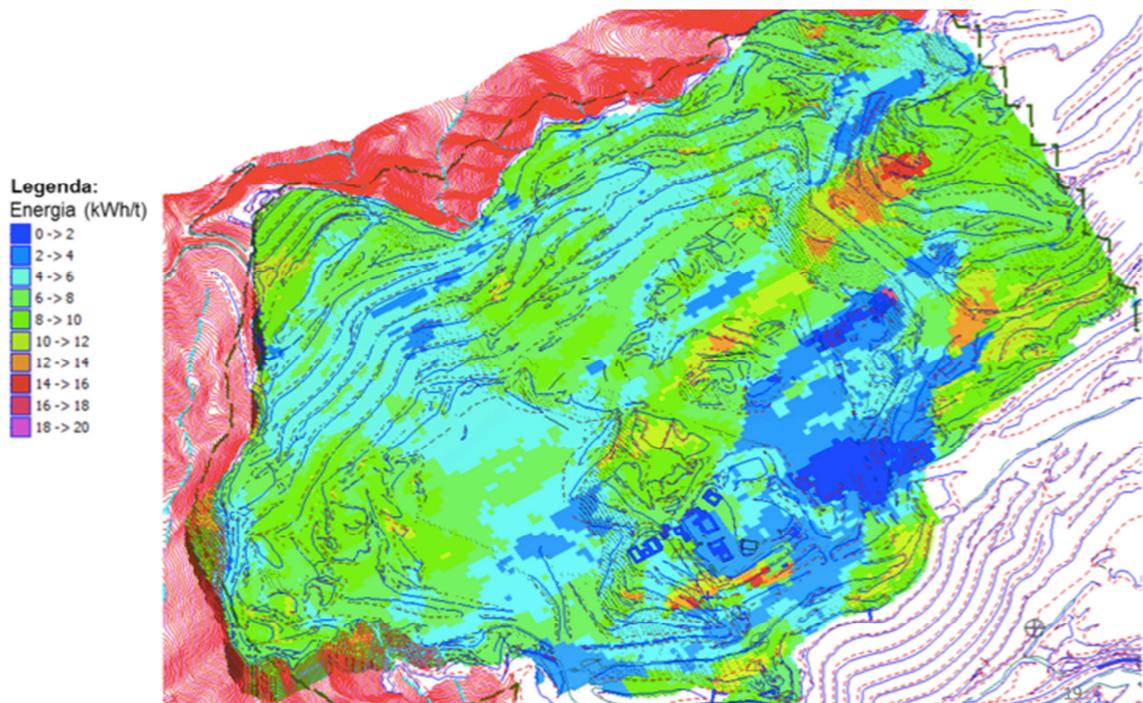


Figura 3.12 - Mapa da mina de Alegria Norte com distribuição dos valores de energia em kWh/t

3.7.4 Mecanismos de fratura das partículas

No processo de cominuição a quebra das partículas se dá por uma distribuição de esforços, variando de uma pequena energia para fragmentar as partículas mais fracas até níveis bem maiores para as outras partículas mais resistentes (Silva, 2003).

Uma partícula somente será fragmentada se for submetida a um esforço maior do que sua resistência, determinada pelas características intrínsecas do material (Silva, 2003), que pode ser traduzida pelas forças de coesão interna dessas partículas. Entretanto, a distribuição de tamanhos do produto de fragmentação não depende apenas da natureza das forças de coesão das partículas, mas também do mecanismo de quebra, atribuída à forma e intensidade da energia aplicada na partícula (Ribeiro, 2004).

Os mecanismos de quebra (figura 3.13), em ordem crescente de energia aplicada, são abrasão, compressão e impacto (Silva, 2003; Ribeiro, 2004; Chagas, 2008) .

Na abrasão, a fratura ocorre quando as forças aplicadas são insuficientes para provocar fraturas ao longo de toda a partícula, ocorrendo o cisalhamento da partícula. Prevalece uma concentração de esforços, na área periférica, que provoca o aparecimento de pequenas fraturas. A distribuição granulométrica resultante desse processo de quebra é aquela em que partículas muito menores em tamanho convivem com partículas de tamanho próximo ao original.

No mecanismo de compressão a fratura ocorre quando forças são aplicadas lenta e progressivamente, permitindo que, com o aparecimento da fratura, o esforço seja aliviado. As forças de compressão aplicadas são pouco superiores à resistência das rochas ou das partículas. O resultado deste mecanismo de quebra são fragmentos de tamanhos relativamente grandes e em pequeno número.

No mecanismo de choque ou impacto as forças de fragmentação são aplicadas de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência das partículas submetidas à fragmentação. A distribuição granulométrica resultante deste mecanismo de quebra é composta predominantemente por partículas de tamanho muito inferior ao tamanho da partícula original.

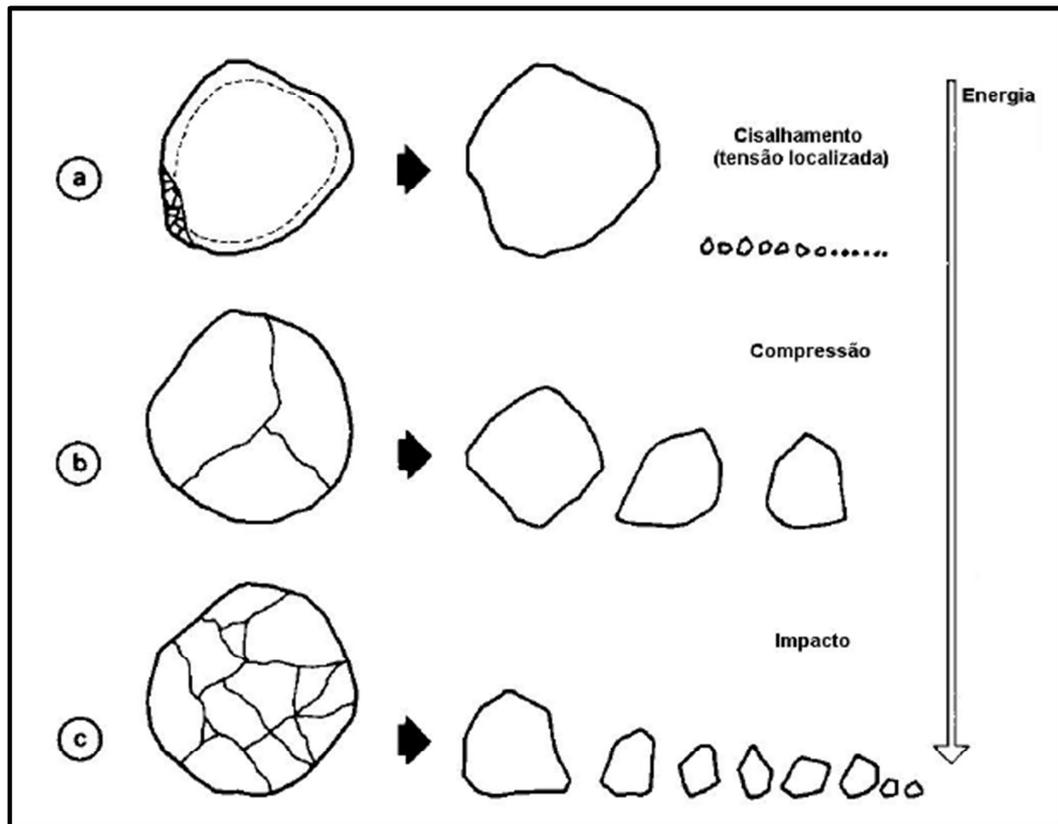


Figura 3.13 – Mecanismos de fratura, energia aplicada e distribuição dos fragmentos resultantes. Ribeiro, 2004.

3.8 Liberação das fases minerais

A liberação mineral é um preceito básico e fundamental para os processos de concentração de minério de ferro (Peres, 2007). O grau de liberação pode ser definido como sendo a condição na qual as espécies minerais, constituintes de um determinado minério, estão livres umas em relação às outras, considerando livres as partículas monominerálicas e mistas aquelas partículas poliminerálicas, constituídas por mais de uma espécie mineral (Pereira, 2009; Porphírio *et al.* 2010; Mantilla, 2013; Ferreira, 2013).

Gaudin (1939) define o grau de liberação como o percentual de determinada espécie mineral que ocorre como partículas livres em relação ao total de partículas, mistas e livres. O grau de associação corresponde ao percentual do mineral que se encontra em partículas mistas em relação ao total.

Pelo método tradicional de Gaudin (1939) o cálculo do grau de liberação é dado pela equação simplificada 3.6, considerando análises efetuadas em um microscópio ótico (Pereira, 2009).

$$Gl = \frac{Pl}{Pl + Pm} * 100$$

(3.6)

onde:

GL = grau de liberação;

Pl = área mineralizada das partículas livres

Pm = área mineralizada das partículas livres + partículas mistas

Gaudin (1939) foi o pioneiro em desenvolver modelos para cálculo do grau de liberação e o seu método é o mais difundido e o mais tradicional entre os pesquisadores e profissionais da indústria mineral, principalmente no minério de ferro. Outros pesquisadores, citados por Stamboliadis (2007), também desenvolveram modelos para quantificar a liberação, tais como, Barbery (1987), Andrews & Mika (1975), Wiegel (1976), King (1979), Wei & Gay (1999).

Neumann *et al.* (2010) afirma que a liberação é uma das informações mais importantes na caracterização de um minério. Os autores descrevem que “o método de Gaudin” é um dos métodos mais clássicos para se obter o grau de liberação de um minério, com a liberação mineral calculada em diversas faixas de tamanho de partículas. Porém, métodos mais modernos de cálculos do espectro de liberação, baseado em análises de imagens, fornecem resultados muito mais precisos e completos.

O espectro de liberação, segundo o autor, consiste na distribuição de composições mineralógicas de partículas em uma população, ou seja, quantas partículas em uma população são ganga liberada, quantas são fase de interesse liberada, quantas são mistas e nestas quantificar a proporção entre os minerais de interesse e de ganga.

Na prática, para elaboração do espectro de liberação, são convencionadas classes de teor, como por exemplo: 0%, 0-10%, 10-20%, 20-30%, 30-40%, 40-50%, 50-60%, 60-70%, 70-80%, 80-90%, 90-100% e 100%. Um técnica interessante de avaliação do espectro de liberação, apresentada por Delbem (2010), consiste em considerar as partículas compostas por 20 unidades e centrar o cruzamento dos retículos nas partículas de modo que cada quadrante represente cinco unidades. Este método está exemplificado na figura 3.14.

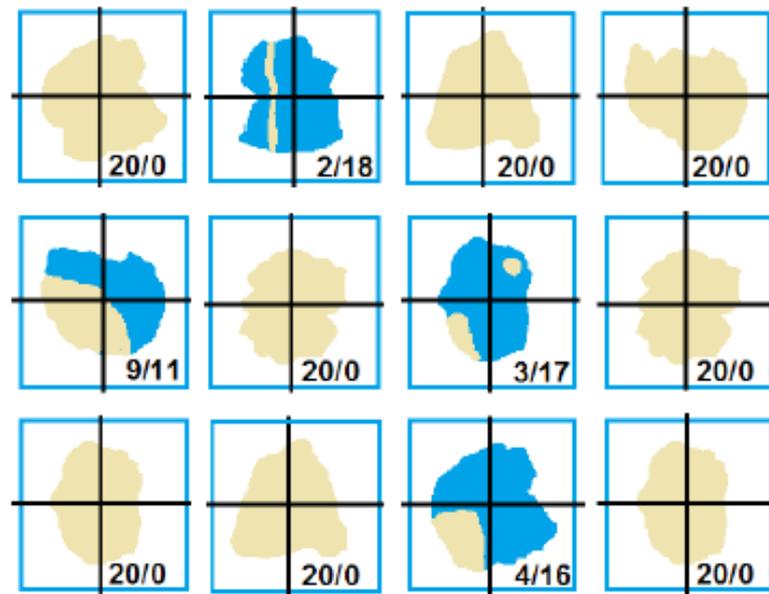


Figura 3.14 – Exemplificação de partículas livres e classes de composição de partículas mistas em uma avaliação de liberação no campo do microscópio (Delbem, 2010).

Pelo exemplo apresentado na figura 3.14, é possível observar que existem oito partículas liberadas e quatro partículas mistas. A proporção das espécies úteis na composição das partículas mistas podem ser contabilizadas em 2, 9, 3 e 4 unidades. Desta forma, o grau de liberação da espécie de interesse (G.L) seria fornecido pela equação abaixo:

$$G. L = \frac{8 \times 20}{((8 \times 20) + (2 + 9 + 3 + 4))} \times 100 = 89,89\%$$

(3.7)

Porphírio *et al.* (2010) atestam que a grande maioria dos minérios ocorrem sob a forma de associações de minerais consolidados, ou seja, espécies úteis estão associadas aos minerais de ganga com maior ou menor coesão, e por isso, é indispensável a utilização da cominuição, incluindo etapas de britagem e moagem, para liberação total do mineral de interesse.

Segundo Ferreira (2013), existe uma correlação intuitiva entre liberação e fragmentação, acreditando que quanto mais fina a fragmentação mais liberadas devem estar as fases minerais.

Entretanto, conforme já mencionado, uma parcela significativa dos custos operacionais de um concentrador é atribuída ao processo de moagem, pelo desgaste excessivo de revestimentos e corpos moedores e, principalmente, pelo elevado consumo energético associado a esta operação.

Desta forma, a cominuição deve ser realizada no limite do necessário, somente o suficiente para promover o grau de liberação adequado para os processos subsequentes. Além disso, a sobremoagem do minério, com geração de partículas ultrafinas, é totalmente indesejável aos processos de concentração.

O grande desafio nos estudos para dimensionamento de novas instalações ou em projetos de *revamp* das usinas existentes é definir qual o ponto ótimo da fragmentação, para se obter a liberação mineral adequada aos processos posteriores de concentração. Segundo Gottlieb *et al.* (1994) *apud* Ferreira (2013), para aplicações práticas no beneficiamento mineral, uma partícula pode ser considerada livre se sua composição volumétrica for superior a 90% da fase mineral de interesse. Segundo Pereira (2009), é razoável se esperar que para um processo de separação do mineral de interesse ser bem sucedido, o “grau de liberação” deva ser maior do que 80%.

O teor e a recuperação do mineral de interesse nos processos de concentração devem ser determinados da maneira como as fases minerais encontram-se associados e não meramente pela quantidade de partículas completamente livres. O tipo de partícula mista e seu comportamento no processo de concentração são fundamentais para obtenção de produtos com a qualidade desejável e boa recuperação (Miller *et al.*, 1982 *apud* Ferreira, 2013).

Desta forma, a obtenção dos espectros de liberação com o detalhamento da distribuição de partículas com diferentes proporções entre as fases presentes, conforme colocado por Neumann *et al.* (2010), se torna essencial.

Gaudin (1939) destaca que o estudo das partículas mistas pode ser desenvolvido sob diferentes óticas.

Em uma abordagem quantitativa, consideram-se as proporções relativas em peso ou volume de cada fase mineral na partícula. Neste caso, o comportamento da partícula mista será intermediário ao comportamento das espécies minerais livres, variando o comportamento conforme a maior ou menor proporção de cada espécie (Ferreira, 2013).

No método qualitativo considera-se a maneira como as espécies minerais estão associadas na partícula. Essa associação está condicionada a diversas características intrínsecas do minério, tais como a textura e trama, tamanho e forma dos cristais e constituição mineralógica, resultado do processo de gênese desse minério. O comportamento das partículas em um processo de separação pode ser intermediário ao dos minerais individualmente ou estar relacionado a apenas uma das espécies, dependendo da associação na partícula. Esta é a abordagem mais tradicional no processo de concentração por flotação, onde o importante é a superfície exposta da partícula, visto que o processo é fundamentado nas propriedades das superfícies. Por exemplo, em um processo de flotação reversa de minério de ferro, uma partícula de quartzo recoberta por goethita, não será coletada para o flotado, mesmo que o quartzo seja predominante em massa e volume em relação à goethita (Gaudin, 1939).

Ainda considerando a abordagem do método qualitativo, Gaudin (1939) classificou as partículas mistas em quatro tipos, dependendo da associação das fases na partícula. O autor considerou partículas binárias para simplificar a análise e relacionou os tipos de partículas mistas ao provável comportamento em um processo de flotação.

- I. Espécies justapostas: o contato entre as espécies é plano ou levemente curva, sugerindo que a partícula provém de uma textura granular em que os grãos são maiores que a partícula em questão. Neste caso, a composição das fases é proporcional à superfície exposta. O comportamento esperado desse tipo de partícula em um processo de flotação será condizente com a composição quantitativa.
- II. Tipo vênulas: uma determinada espécie mineral ocorre em vênulas em outra espécie. É um tipo muito raro e quando presente é a espécie mais difícil de

liberar e seu comportamento na flotação está condicionado pela proporção das fases.

- III. Recobrimento: ocorre quando uma das fases recobre a outra. O comportamento da partícula na flotação dependerá da superfície da espécie que estará exposta, independente da abundância relativa das fases.
- IV. Inclusão: uma das espécies está disseminada na outra espécie sob a forma de diminutas inclusões. Este tipo de partícula é o principal responsável pelas perdas dos elementos de interesse no rejeito ou pela presença dos minerais de ganga no concentrado. O comportamento da partícula mista com inclusões está condicionado à espécie mais abundante na partícula, pois respondem à flotação como se fossem uma espécie “livre”, já que as inclusões geralmente correspondem a menos do que 5% proporcional.

A figura abaixo (3.15) apresenta fotomicrografias dos quatro tipos de partículas mistas, conforme descritas por Gaudin.

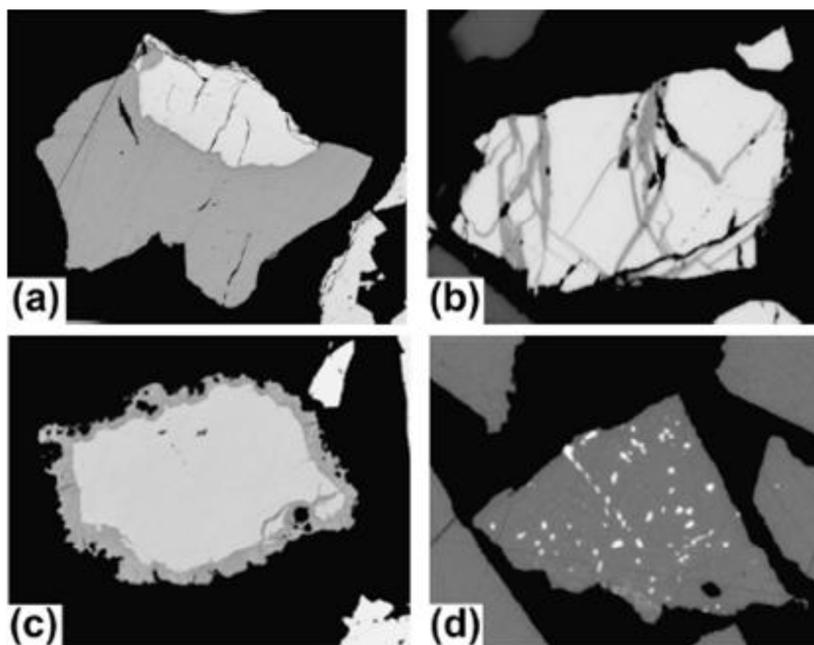


Figura 3.15 – fotomicrografias exemplificando os quatro tipos de partículas mistas descritas por Gaudin (1939). (a) espécies justapostas, (b) partículas tipo vênulas, (c) recobrimento e (d) inclusões. Pérez-Barnuevo *et al.* (2013) *apud* Ferreira (2013).

Gaudin (1939) argumenta que a liberação mineral vai ocorrer de diferentes maneiras dependendo das algumas características intrínsecas das espécies minerais, tais como

dureza, tenacidade e clivabilidade e das características das partículas de forma geral, tais como arranjo dos grãos, coesão entre cristais, morfologia dos cristais, textura, porosidade, bandamento, xistosidade e presença de zonas de fraquezas naturais. Segundo Porphírio *et al.* (2010), as principais características do minério que influenciam na liberação dos minerais são as dimensões, formas e intercrescimentos dos grãos, coesões interna e entre os grãos, tipos de associações minerais e proporção dos minerais presentes.

Baseado neste conceito, Gaudin (1939) destacou dois mecanismos distintos atuantes na liberação mineral, dependendo do fraturamento do mineral e da partícula. A liberação intergranular ocorre por destacamento de grão enquanto que o fraturamento intracristalino se dá na liberação por redução de tamanho.

A liberação por destacamento ocorre ou quando as propriedades físicas dos minerais em contato em uma partícula forem suficientemente distintas, ou se a coesão entre os grãos forem consideravelmente fracas. Assim, as fraturas resultantes do processo de cominuição irão ocorrer preferencialmente nas bordas dos cristais e a liberação das fases tende a ser completa com a fragmentação e redução no tamanho dos grãos.

A liberação por redução de tamanho ocorre quando as fraturas tendem a acontecer no interior dos cristais e não nas bordas. O resultado desse tipo de fragmentação são partículas mistas remanescentes após o processo de cominuição.

Ferreira *et al.* (2011) apresentaram fotomicrografias de minérios de ferro com a tendência de liberação por destacamento e com tendência de ocorrer liberação por redução de tamanho (figura 3.16).

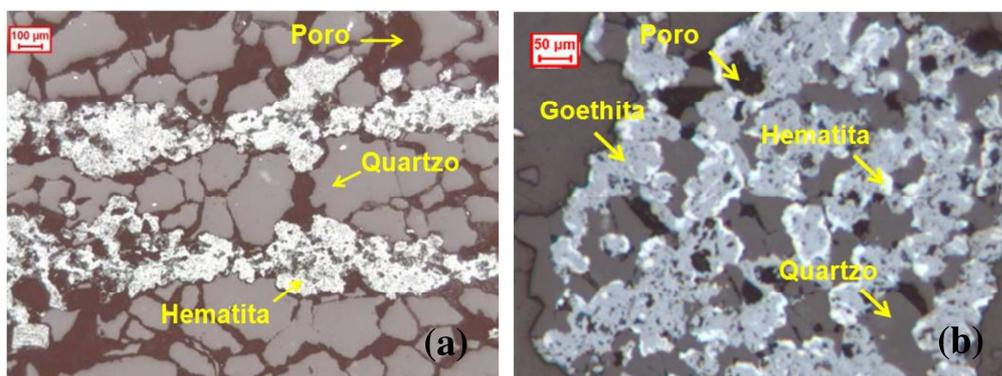


Figura 3.16 – (a) fotomicrografia de um itabirito friável com partículas com tendência de liberação por destacamento. (b) fotomicrografia de um itabirito com partículas com tendência de liberação por redução de tamanho (Ferreira *et al.*, 2011)

3.9 Caracterização de minérios via microscopia de luz refletida (MLR)

Tradicionalmente, o grau de liberação é determinado a partir de observações sistemáticas de partículas ao microscópio óptico, através de contagem de classes de partículas livres e mistas. Pereira (2009) propõe que essas partículas mistas sejam subdivididas em subclasses, em função das proporções relativas do mineral útil presente. Os tipos de partículas livres e mistas estão esquematizados na figura 3.17 e exemplificados com fotomicrografias de diversas amostras de minério de ferro.

As partículas denominadas como tipo 1 correspondem a partículas liberadas de quartzo. Porém, de acordo com a experiência de diversos mineralogistas especialistas em minério de ferro, é muito raro se encontrar no Quadrilátero Ferrífero partículas monominerálicas de quartzo, pois sempre haverá, pelo menos, uma inclusão de um grão de óxidos/hidróxido de ferro, por mais diminuto que este grão possa ser. Desta forma, para os estudos realizados neste trabalho, as partículas tipo 2 abrangerão as partículas tipo 1, caso existam nas amostras estudadas, sendo consideradas como partículas liberadas de quartzo.

As partículas denominadas como tipo 3 correspondem a partículas mistas compostas essencialmente por uma das fases presentes no minério, no caso deste trabalho, por óxidos/hidróxido de ferro ou quartzo. O grão constituinte principal da partícula mista apresenta dimensões aproximadas ao tamanho médio das partículas da amostra. Grãos de outra fase ocorrem em menor proporção na partícula, como inclusões ou na borda do grão maior.

No caso das partículas mistas denominadas como complexas tipo 4, as partículas são compostas por diversas fases, principalmente óxidos/hidróxido de ferro e quartzo, e os seus grãos apresentam tamanhos significativamente menores do que a própria partícula. Os grãos se caracterizam por se apresentarem muitas vezes irregulares, subédricos ou anédricos, proporcionando um contato imbricado entre eles, com junções tríplices, podendo caracterizar um contato poligonal ou até mesmo interlobado. Os grãos de óxidos/hidróxido de ferro apresentam inclusões de minerais de ganga e os grãos de ganga inclusões de portadores de ferro. Quando submetidos à cominuição, as partículas mistas tipo 4 tendem a gerar novas partículas mistas, dos demais tipos e também do tipo 4 (figura 3.18).

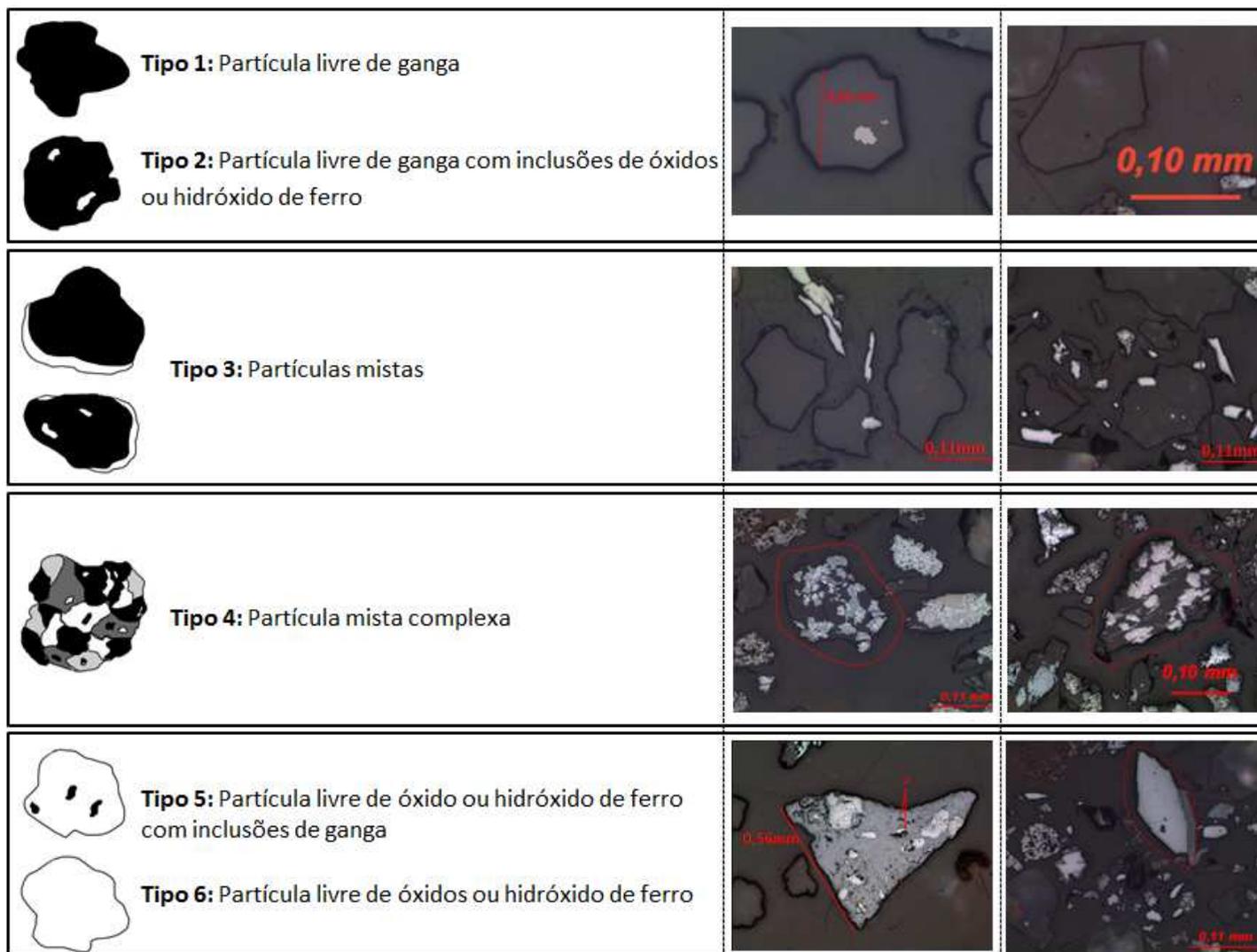


Figura 3.17 – exemplificação esquemática para classificação das partículas, livres e mistas.

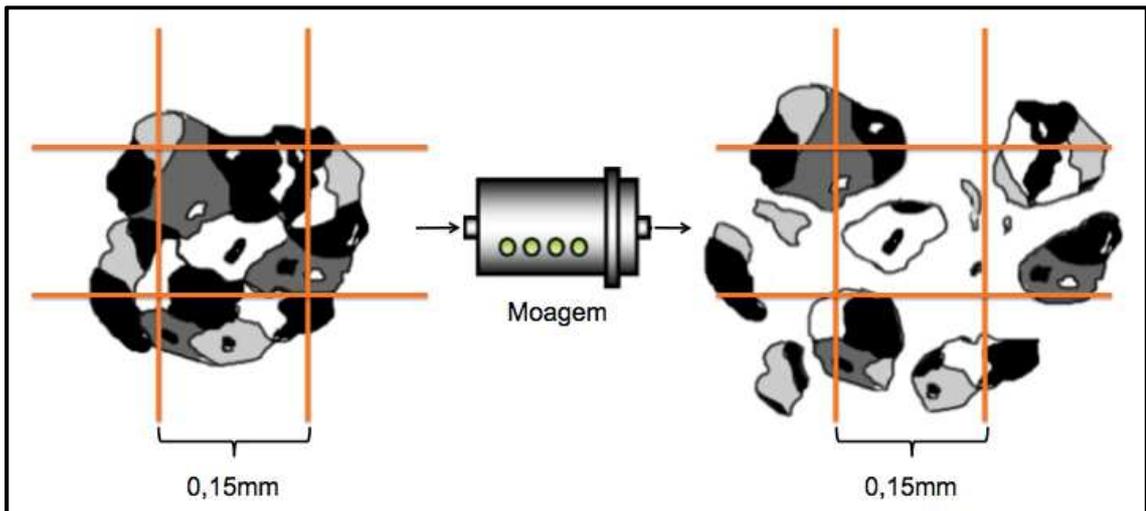


Figura 3.18 – Representação esquemática de uma partícula mista tipo 4, antes e depois do processo de moagem na malha de 0,15mm, gerando novas partículas mistas.

As partículas mistas, tipo 3 e tipo 4, são ainda discriminadas em subclasses em função das proporções relativas das espécies minerais úteis que compõem essas partículas. São consideradas quatro subclasses de acordo com a proporção de óxidos e/ou hidróxido de ferro na composição das partículas. As subclasses obedecem as seguintes proporções: até 10% de óxidos/hidróxido de ferro na partícula, entre 10% e 50% de portadores de ferro na partícula, entre 50% e 90% de óxidos/hidróxido de ferro na partícula e mais de 90% destes na composição da partícula mista.

As partículas tipo 5 constituem aquelas que podem ser consideradas como liberadas, constituídas por óxidos/hidróxido de ferro com algumas inclusões de minerais de ganga, principalmente o quartzo. Já as partículas denominadas como tipo 6 correspondem a partículas monocristalinas e monominerálicas, constituídas essencialmente por minerais portadores de ferro.

Ainda segundo a autora, o conceito de partícula livre, caracterizada com uma partícula constituída exclusivamente por mineral útil, na prática, pode ser flexibilizado, dependendo das especificações da matéria-prima e da assembleia mineralógica presente.

Para determinação clássica do grau de liberação, é necessária a contagem e classificação de pelo menos 500 partículas por faixa granulométrica.

Pereira (2009) completa que a contagem e classificação das partículas consistem da análise com incremento fixo (que depende da magnificação, em função basicamente do tamanho do grão) nos eixos X e Y da platina acoplada ao microscópio óptico, onde se contam o número de interceptos de cada partícula, identificada com o cruzamento dos retículos, no centro do campo de observação do microscópio.

A contagem é efetuada em planilha, previamente elaborada por profissionais responsáveis pelas análises, de acordo com o objetivo do estudo em questão.

No presente trabalho, a determinação do grau de liberação e a classificação dos tipos de partículas livres e partículas mistas foi realizada pela metodologia proposta por Pereira (2009). Os resultados de distribuição dos tipos de partículas livres e mistas são apresentados em gráficos de setores, também conhecido como gráficos de “pizza”, conforme demonstrado no exemplo abaixo da figura 3.19. Os gráficos estão padronizados para todas as amostras de forma que a cor amarela corresponde aos tipos de partículas tipo 1 e tipo 2, a cor rosa representa as partículas mistas tipo 3, a cor vermelha indica as partículas mistas denominadas como partícula mista complexa tipo 4, a cor azul em uma tonalidade mais clara representa o tipo 5 e finalmente, a cor azul mais escura corresponde as partículas tipo 6.

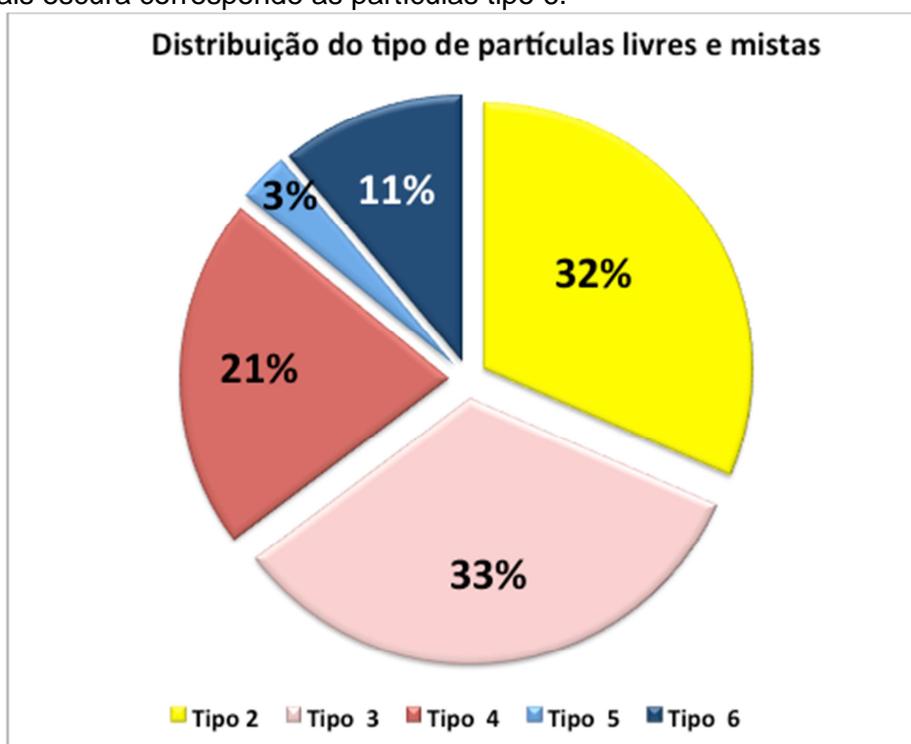


Figura 3.19 – Exemplo do gráfico de apresentação dos tipos de partículas livres e mistas.

3.10 Caracterização de minérios por análise digital de imagens

3.10.1 Imagem digital

A análise de imagens é um dos métodos mais antigos de identificação e quantificação das fases na caracterização mineralógica de minérios, uma vez que a contagem manual de pontos em microscópios ópticos de luz transmitida ou refletida é utilizada há muitas décadas. Para se obter um valor minimamente significativo é necessário a contagem de milhares de pontos, implicando em muito tempo de operador especializado (Neumann *et al.*, 2010) estando suscetível a parcialidade do operador.

O avanço da contagem manual de pontos está em sistemas automatizados (computadorizados) de análise digital de imagens, onde são considerados os *pixels* de uma imagem, tendendo a ser muito mais precisa e rápida. A análise digital de imagens viabiliza a caracterização de várias amostras em um período de tempo muito reduzido, fornece representatividade estatística, com a contagem de milhares de partículas, com excelente repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados.

Uma imagem digital pode ser definida como uma matriz de *pixels*, de dimensões x linhas por y colunas, com cada elemento possuindo um atributo numérico z , correspondendo à intensidade luminosa da imagem real naquele ponto, por exemplo, o nível de cinza. As imagens podem ser monocromáticas (tons de cinza) ou coloridas usando o padrão RGB. Cada componente pode ter uma precisão inteira, inteira positiva, ponto flutuante e complexa. A precisão inteira pode ter 8, 16 ou 32 *bits* por *pixel* e a precisão de ponto flutuante pode ter 32 ou 64 *bits* por *pixel* (Scuri, 1994; Brys, 2008; Delbem, 2014).

Por exemplo, a figura 3.20 exibe uma imagem digital em tons de cinza de 8 *bits*. A área em destaque na imagem mostra de forma numérica a intensidade dos *pixels*.

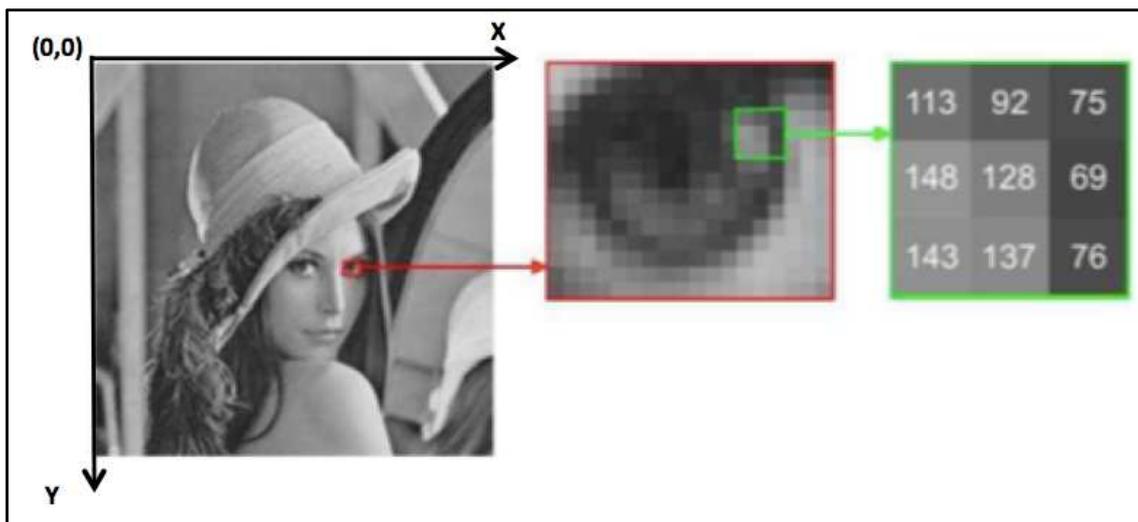


Figura 3.20 – Representação de uma imagem digital de 8 bits, destacando de forma numérica a intensidade dos *pixels* (Gomes, 2007 *apud* Mantilla, 2013).

Uma imagem monocromática de 8 bits apresenta uma escala de níveis de cinza que variam de 0 a 255, correspondendo a 256 níveis de intensidade de cor, sendo o valor “0” indicando o preto absoluto e o “255” o branco absoluto. As intensidades intermediárias representam às várias tonalidades de cinza (Delbem, 2014). Na imagem da figura 3.20, por exemplo, a intensidade “69” representa um cinza escuro e a intensidade “137” corresponde a um cinza médio.

A resolução espacial de uma imagem é a grandeza que mede a qualidade da imagem, reflete o número de *pixels* por unidade de área. Quanto maior o número de pixels de uma imagem maior a resolução e mais rica em detalhes será esta imagem. A resolução de intensidade (quantização) corresponde ao número máximo de níveis de intensidade de cor que a imagem pode apresentar (Mantilla, 2013; Delbem, 2014).

Na figura 3.21 são apresentadas quatro imagens monocromáticas em diferentes resoluções espacial e de intensidade. A resolução espacial varia na horizontal, da esquerda para a direita, com a imagem de menor resolução com 128 x 128 *pixels* e a imagem com melhor resolução com 512 x 512 *pixels*. A resolução de intensidade varia na vertical com as imagens de cima com menor número de níveis de cinza (2 bits = 4 níveis de cinza) enquanto que as imagens de baixo apresentam maior resolução de intensidade, com maior número de níveis de cinza (8 bits = 256 níveis de cinza). Na figura 3.20, a imagem de baixo e do lado direito é aquela que apresenta maior riqueza de detalhes, com melhor resolução espacial e de intensidade.



Figura 3.21 – Imagem digital com variação de resolução espacial e de intensidade. (Paciornik, 2011 *apud* Mantilla, 2013).

A resolução espacial e de intensidade são parâmetros importantes no processamento e análise digital de imagens e que devem ser escolhidos adequadamente na etapa de aquisição das imagens. A resolução espacial deve ser alta o suficiente para permitir que medidas de tamanho possam ser feitas com precisão e a resolução de intensidade deve ser alta o suficiente para que o contraste entre as fases seja percebido no processamento (Delbem, 2014).

Uma das formas mais comuns de se representar a distribuição dos níveis de intensidade de uma imagem digital, por exemplo tons de cinza, e possivelmente uma das ferramentas mais úteis no processamento digital de imagens, é por meio dos histogramas.

O histograma é uma representação gráfica de uma imagem digital, fornece a informação de quantos *pixels* da imagem possuem determinado nível de intensidade na escala. No eixo X é apresentado a escala de níveis de intensidade e no eixo Y o número de *pixels* para cada nível de intensidade (Brys, 2008; Mantilla, 2013; Delbem, 2014).

A figura 3.22, apresentada por Delbem (2010), mostra uma imagem monocromática de 8 *bits* com seu respectivo histograma. Pela imagem observa-se que a maioria dos *pixels* que representa a imagem possui tons de cinza próximos a 70, que corresponde a um tom de cinza mais escuro. Em menores proporções, existem *pixels* com níveis próximos a 125, 145, 155, 230 e 250.

O histograma é a base de diversas técnicas utilizadas no processamento e análise digital de imagem, sendo amplamente utilizado na etapa de segmentação.

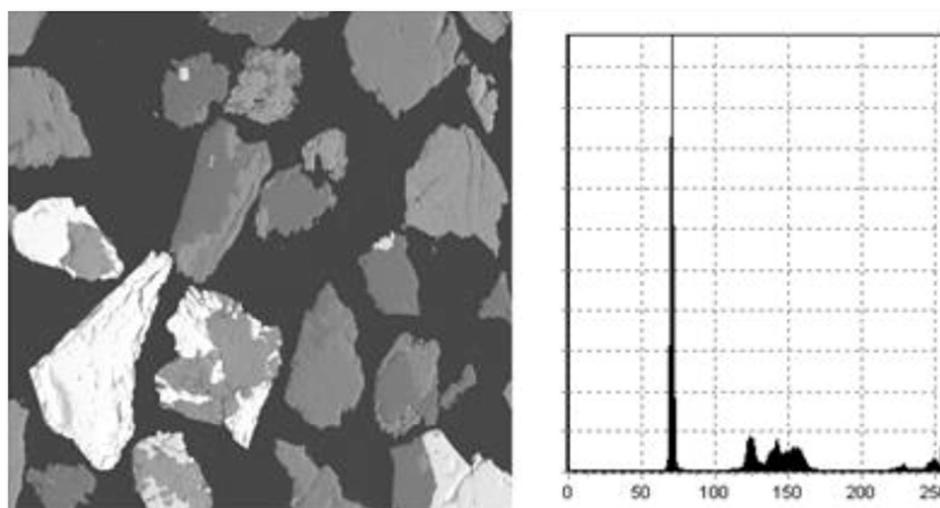


Figura 3.22 – Exemplo de uma imagem monocromática de 8 *bits* e o seu respectivo histograma. Delbem (2010).

Outro fator fundamental no processamento e análise digital de imagens é o ajuste e as manipulações do brilho e do contraste de uma imagem, pois, além de melhorar a sua aparência, facilita a aplicação de diversas técnicas de processamento e, principalmente da segmentação (Mantilla, 2013; Delbem, 2014). Em linhas gerais, o brilho e o contraste de uma imagem digital podem ser matematicamente descritos como a média e o desvio padrão, respectivamente, dos níveis de intensidade de todos os *pixels* da imagem (Weeks, 1996 *apud* Delbem, 2014).

O brilho pode ser definido como a localização dos níveis de intensidade dos *pixels* dentro da escala de cor. Por exemplo, considerando uma imagem monocromática de 8 *bits*, se a maioria dos seus *pixels* possuírem níveis de intensidade próximos a 255, que equivale ao branco absoluto, significa que a imagem será considerada como clara, ou seja, alto brilho (figura 3.23a). Inversamente, se os valores de níveis de cinza de seus *pixels* forem predominantemente próximos a 0 (preto absoluto), a imagem será

considerada escura, isto é, de baixo brilho (figura 3.23b) (Mantilla, 2013; Delbem, 2014).

O contraste de uma imagem refere-se a variabilidade dos níveis de intensidade dos *pixels*, dentro da escala de cor da imagem. Quanto mais distribuídas forem a intensidade dos seus *pixels* na escala, maior será o contraste (figura 3.23c), e quanto menor a variação dos níveis de intensidade na escala menor será o contraste da imagem (figura 3.23d) (Mantilla, 2013; Delbem, 2014).

Observando as imagens (c) e (d) da figura 3.23, onde há uma variação considerável no contraste das imagens, é possível observar que os respectivos histogramas são bastantes distintos. Na imagem (c) com maior contraste, o histograma mostra os níveis de intensidade dos *pixels* preenchendo toda a escala de cinza. Como consequência, a imagem exibe boa correspondência em relação aos detalhes de níveis de cinza. Já na imagem de contraste baixo, exibida na figura 3.23 (d), o histograma mostra que os níveis de intensidade dos *pixels* não variam muito, se concentrando em uma curta faixa na região central da escala de cinza, e por isso, não permite uma boa percepção de seus detalhes (Delbem, 2014).

Apesar das técnicas existentes para manipulação do brilho e contraste nas imagens digitais, o ideal é que a aquisição das imagens sejam adequadas, de forma a apresentarem o histograma abrangendo toda a escala de níveis de intensidade de cor, garantindo assim que a imagem digital apresente o maior número de níveis de intensidade possível.



Figura 3.23 – exemplo de imagens monocromáticas com diferentes ajustes de brilho e contraste e seus respectivos histogramas. (a) imagem clara, alto brilho; (b) imagem escura, baixo brilho; (c) imagem com alto contraste; (d) imagem com baixo contraste. Delbem (2014).

As imagens também pode ser coloridas, segundo o padrão de cores denominado de RGB (*red-green-blue*). Uma imagem RGB pode ser considerada como um sistema tridimensional onde associa-se em cada eixo (x, y e z) os valores de intensidade das cores primárias, vermelho, verde e azul. A cor do *pixel* é formada a partir da combinação das intensidades dessas cores primárias. A imagem RGB é considerada como sendo uma combinação *pixel a pixel* de três imagens monocromáticas de 8 *bits* (256 níveis de intensidade), nas escalas de vermelho, verde e azul (Mantilla, 2013; Delbem, 2014).

Para cada uma das três imagens o valor de intensidade de 0 significa o preto absoluto enquanto que o valor de 255 representa a cor mais intensa da escala, seja o vermelho absoluto, o verde absoluto ou o azul absoluto. Já os valores entre 0 e 255 representam as variações de intensidade de vermelho, verde e azul. As imagens RGB, por ser uma imagem originada pela combinação de três imagens monocromáticas de 8 bits, possui uma quantização de 24 *bits*, ou seja, $2^{24} = 16777216$ cores (Delbem, 2014).

A figura 3.24 exibe uma imagem RGB (a) com detalhe para uma pequena área onde as intensidades de vermelho, verde e azul de alguns *pixels* são expostas numericamente. As demais imagens da figura 3.24, (b), (c) e (d), apresentam as imagens componentes de vermelho, verde e azul, respectivamente, que, combinadas *pixel a pixel* forma a imagem RGB (a) (Delbem, 2014).

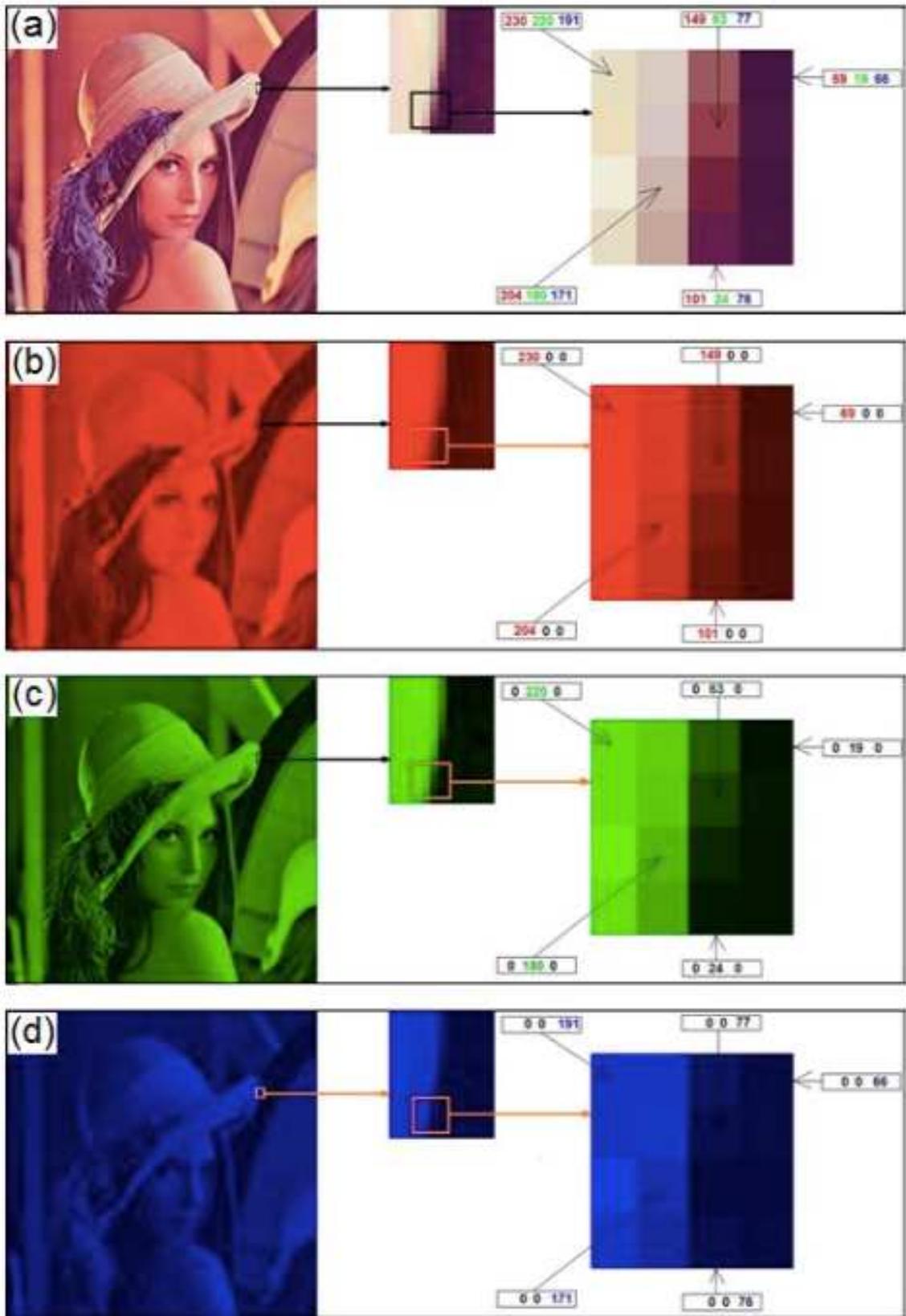


Figura 3.24 – (a) imagem digital RGB; (b) imagem componente na escala de vermelho; (c) imagem componente na escala de verde; (d) imagem componente na escala de azul. Delbem (2014).

3.10.2 Processamento e análise digital de imagens

As diversas técnicas utilizadas no processamento de imagens foram inicialmente desenvolvidas para aplicação em imagens aéreas e de satélites. Com o avanço da tecnologia digital, *hardware* e *software*, as técnicas de processamento e análise digital de imagem passaram a ser aplicadas em inúmeras áreas da ciência, com exemplo, medicina, ciências biológicas, ciência dos materiais, artes, arqueologia e etc. Na área da mineração, conforme exposto por Delbem (2014), a caracterização mineralógica e estudos de grau de liberação passaram a ser conduzidos incluindo a análise digital de imagens.

O processamento e análise digital de imagem (PADI) pode ser descrito por uma sequência de etapas, conforme demonstrado na figura 3.25. Um sistema PADI pode ser discriminado em três grandes etapas fundamentais, aquisição da imagem digital, o processamento digital de imagens (PDI) e a análise digital de imagem (ADI).

A aquisição da imagem compreende a formação e digitalização da imagem. O PDI consiste na etapa de pré-processamento, incluindo operações matemáticas para alterar os valores dos *pixels* de uma imagem digital, com objetivo de preparar a imagem para a etapa de análise, melhorando a qualidade da imagem, corrigindo possíveis problemas gerados na fase de aquisição ou realçando detalhes de interesse da imagem. A análise digital de imagens (ADI) compreende as etapas que utilizam de técnicas para a extração e tratamento de dados quantitativos contidos na imagem, como por exemplo tamanho, forma, posição e textura dos objetos estudados. A ADI compreende as etapas de segmentação, pós-processamento e extração, reconhecimento e classificação de atributos (Mantilla, 2013; Delbem, 2010; Delbem, 2014).

A etapa de pré-processamento utiliza de várias técnicas, conforme descrito em Mantilla (2013) e Delbem (2014), para melhorar a qualidade da imagem, tais como:

- **Correção de fundo:** é uma operação comum no pré-processamento de imagens, particularmente na microscopia ótica é constantemente necessária para correção de defeitos na captura da imagem. A técnica mais utilizada para essa correção é a subtração de imagens de *background*, por meio de operações aritméticas de imagens.

- **Filtro de delineação:** tem por objetivo realçar as bordas de uma imagem. Em imagens de microscopia ótica de luz refletida e principalmente de elétrons retroespalhados (BSE) provenientes de um MEV, é normal que os *pixels* das fronteiras entre fases muito contrastantes apresentem valores de intensidades intermediários aos das fases vizinhas. A aplicação do filtro permite encontrar as transições entre as fases e definir em qual delas esses *pixels* pertencem.
- **Filtro de nitidez:** é uma operação utilizada para aumentar a nitidez da imagem, visto que, no momento da aquisição da imagem, principalmente no MLR, ocorre um leve ruído na transformação da luz para os *pixels*, deixando-os um pouco difusos.
- **Expansão de contraste:** ferramenta que tem por objetivo expandir o contraste da amostra de modo a facilitar a sua visualização e identificação.

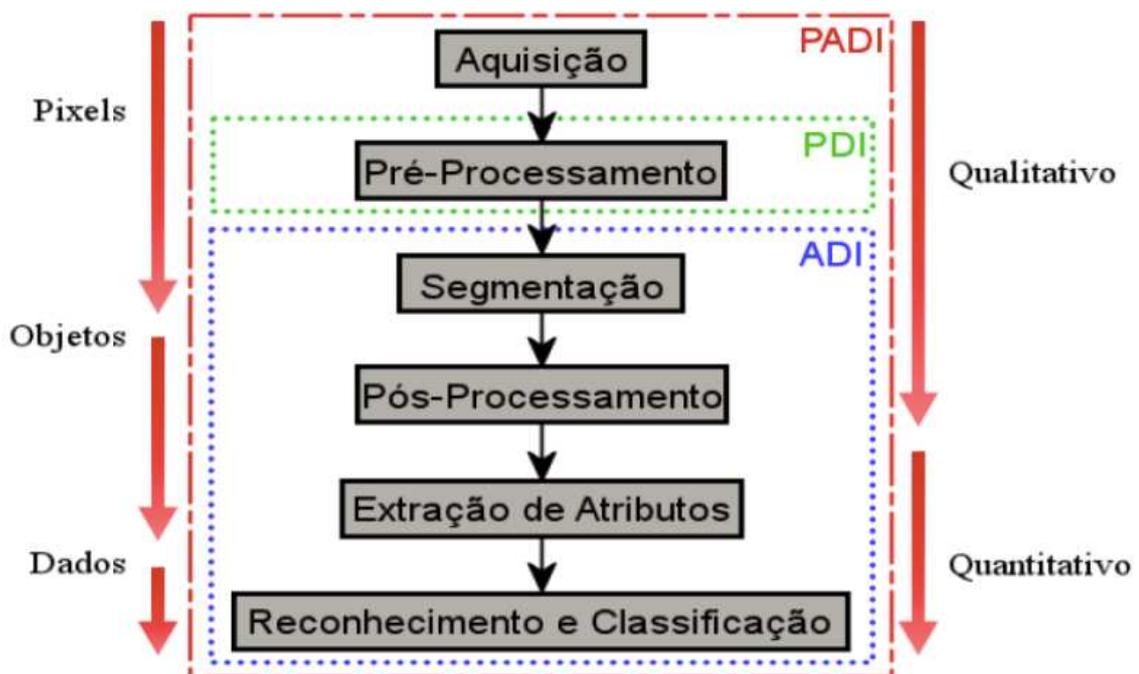


Figura 3.25 – Sequencia de etapas fundamentais do PADI. (Gomes, 2007 *apud* Delbem, 2014).

A etapa de segmentação é uma etapa fundamental no processamento e análise digital de imagens, podendo ser uma ferramenta de difícil ou fácil aplicação, dependendo da imagem analisada. A sua correta execução servirá de base para a etapa de aquisição da informação, medição e geração de atributos (Mantilla, 2013).

Existem várias técnicas de segmentação baseadas em diferentes princípios, que deverão ser aplicadas dependendo do tipo de material analisado, do tipo de instrumento analítico utilizado, dos objetivos específicos e tipos de problemas a ser resolvido em cada estudo (Mantilla, 2013; Delbem, 2014).

Uma das técnicas de segmentação mais utilizada em sistemas de processamento digital de imagem aplicado à tecnologia mineral, pela sua simplicidade, é a limiarização de histograma (Delbem, 2014).

A limiarização é uma técnica baseada no princípio de que nas imagens de MEV-BSE e MLR obtidas em seções polidas de minérios, cada fase mineral é representada por *pixels* que se enquadram dentro de uma determinada faixa de intensidade. Desta forma, a segmentação só será efetiva quando as fases apresentarem faixas de intensidades diferentes umas das outras (Delbem, 2014). Graficamente as fases são representadas por picos nos histogramas, e os limiares de corte são colocados nos vales, entre os picos, para separá-las. Os resultados da segmentação serão melhores quanto mais baixos os vales e mais separados e bem definidos forem os picos do histograma.

A figura 3.26 mostra um exemplo de segmentação por limiarização de histograma. A imagem exibida na figura 3.26a mostra uma imagem de um minério de ferro composto essencialmente por quartzo e hematita. A imagem foi obtida por um MEV-BSE. Na figura 3.26b encontra-se o histograma da imagem utilizado para a segmentação por limiarização, com destaque para os limiares de corte, que delimitam os intervalos de intensidades de cinza que representam cada fase da imagem. A figura 3.26c mostra a imagem já segmentada (Delbem, 2014).

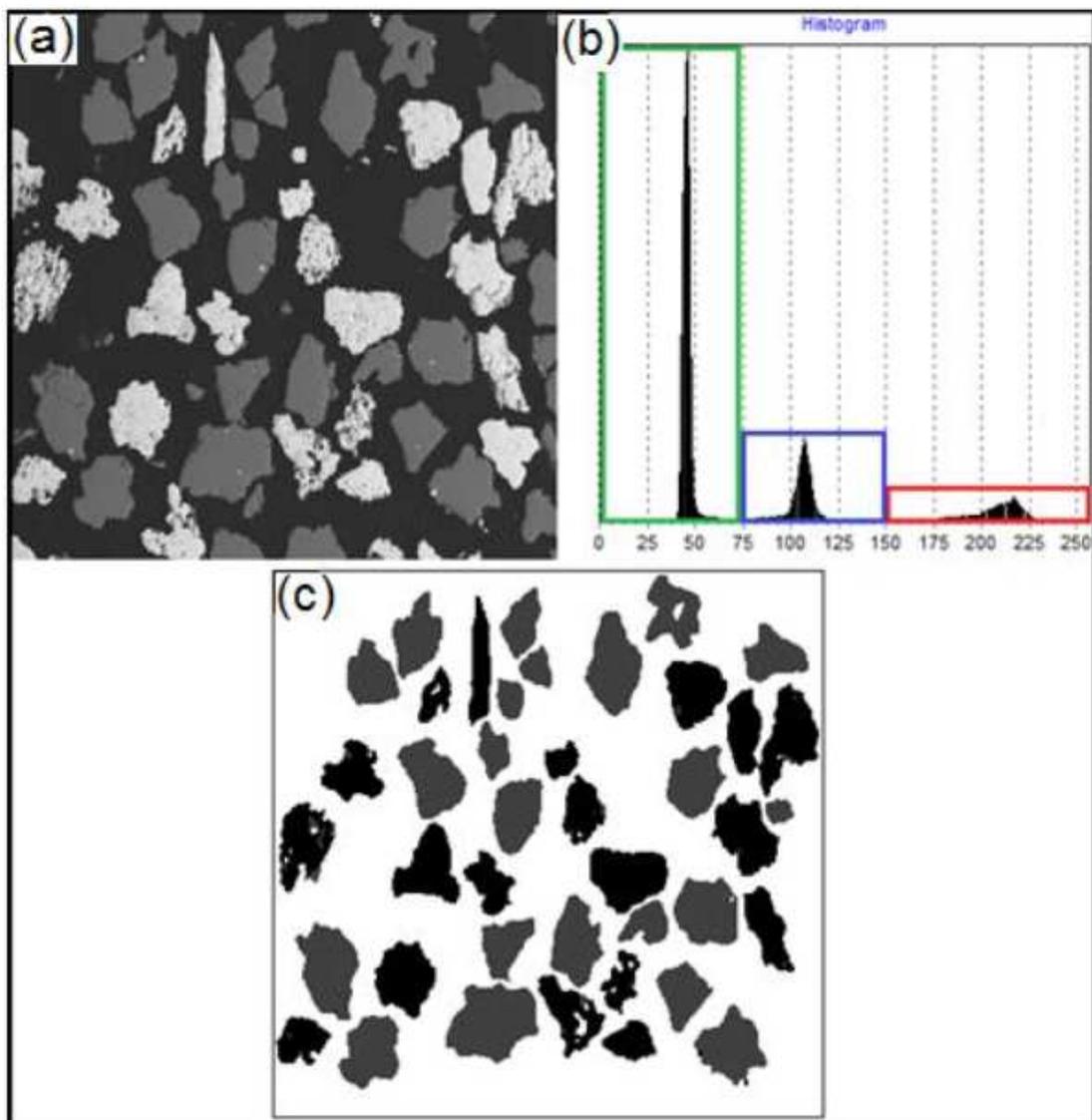


Figura 3.26 – (a) imagem em 256 níveis de cinza; (b) histograma da imagem indicando os limiares de corte; (c) imagem segmentada. Delbem (2014).

Seguindo as etapas elementares do processamento de imagens, após a segmentação, é necessário o pós-processamento para corrigir, suavizar e preparar a imagem para as próximas etapas. Mesmo nas melhores condições e após um processo de segmentação eficiente, ainda podem existir defeitos residuais na imagem que impossibilitem a extração de informações ou uma possível classificação (Mantilla, 2013). O objetivo da etapa de pós-processamento é melhorar o resultado da segmentação. Técnicas de unir, separar e eliminar objetos na imagem são comuns nessa etapa. As técnicas normalmente utilizadas são baseadas em operações lógicas e de morfologia matemática (Serra, 1988 *apud* Delbem, 2014).

Após o as etapas de segmentação e pós-processamento, inicia-se a etapa de análise digital de imagens, para a extração e tratamento de dados quantitativos contidos na imagem, como por exemplo tamanho, forma, posição e textura dos objetos estudados. As principais etapas da ADI são:

- **Extração de atributos:** esta etapa consiste na aquisição de informações quantitativas relacionadas ao, tamanho, forma, posição e textura dos objetos em estudo na imagem. Existem basicamente dois tipos de medidas, as medidas de campo que medem o campo da imagem como um todo, e as medidas de região que correspondem à medição em cada objeto da imagem, independentemente (Mantilla, 2013; Delbem, 2014). Como exemplo de técnica aplicada nesta etapa, tem-se as medições de área para calcular a área percentual relativa de cada fase mineral em relação às fases presentes no minério e a contagem de objetos referente as partículas liberadas de uma amostra (Mantilla, 2013).
- **Reconhecimento e classificação:** nesta etapa é realizado o tratamento dos dados quantitativos obtidos na etapa de extração de atributos.

3.10.3 Mineral Liberation Analyzer (MLA)

Nos estudos associados à caracterização mineralógica, principalmente para a área de mineração, as imagens mais utilizadas na análise digital de imagens são aquelas obtidas no microscópio eletrônica de varredura (MEV), com destaque para as imagens geradas pelo detector de elétrons retroespalhados (Neumann *et al.* 2010).

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um instrumento utilizado na caracterização mineralógica para estudar detalhadamente partículas de dimensões ínfimas (menores que 1 μm), microestruturas e tipologia das superfícies das espécies presentes, como análise complementar à microscopia ótica. Geralmente acoplado ao MEV, os microanalisadores EDS (espectrômetro de raios-X dispersivo em energia) permitem associar-se a composição química à imagem da amostra (Brandão, 2012).

No MEV-EDS as áreas a serem examinadas são irradiadas com um feixe de elétrons finamente focado que pode ser estático ou varrer a superfície da amostra. Os elétrons secundários, elétrons retroespalhados, elétrons Auger e raios-X característicos são alguns tipos de sinais produzidos quando o feixe de elétrons incide sobre a amostra.

Esses sinais são obtidos de uma região específica dentro da amostra e podem ser utilizados para examinar várias de suas características, tais como, composição, topografia e cristalografia, dentre outras (Brandão, 2012; Rocha, 2008).

Os sinais de maior interesse e utilização nos estudos de caracterização mineralógica são os elétrons secundários e, principalmente, os elétrons retroespalhados. Os elétrons secundários são originados em uma região relativamente pequena da amostra, possuem uma energia relativamente baixa, gerando uma imagem de altíssima resolução e a possibilidade de se trabalhar em aumentos maiores. Os elétrons retroespalhados são de energia relativamente elevada, sendo a intensidade variando com a composição química dos átomos da amostra. As imagens geradas são de menor resolução e permitem menores aumentos (Brandão, 2012; Rocha, 2008).

O contraste das imagens geradas por elétrons retroespalhados depende da massa específica das fases da amostra, da topografia da amostra e da composição química (número atômico) das fases (Brandão, 2012). Desta forma, pelas imagens de elétrons retroespalhados é possível a distinção entre as espécies através dos diferentes tons de cinza das fases minerais, de acordo com o número atômico médio dos elementos constituintes dessas fases (Neumann *et al.* 2010).

Se as fases apresentarem contraste suficiente para serem distinguidas, é possível utilizar um software de processamento de imagens para realizar as contagens, em números de *pixels*, para a faixa de nível de cinza correspondente a cada mineral e efetuar as quantificações desejadas (Neumann *et al.* 2010). Segundo o autor, a quantificação das fases por análise digital de imagens tem sua limitação fundamental quando não há contraste entre as fases, de forma que não se consegue segmentar as fases no processamento de imagem. Baseado nesta limitação que dois dos maiores centros de pesquisa do mundo, ambos australianos, em associação com fabricantes de MEV's, lançaram sofisticados e dispendiosos sistemas de análise de imagens acoplados com analisadores químicos.

O QEMSCAN (*quantitative evaluation of materials by scanning electron microscopy*), da FEI Company, é um sistema automático de análise mineralógica quantitativa, que compreende as tecnologias SEM (*scanning electron microscope*) e detectores de EDS, além de software para análise automática de imagem. Os minerais são identificados pelos sinais de elétrons retroespalhados (BSE), em combinação com emissão de raios-X induzidas por elétrons, ocorrendo a categorização dos seus *pixels* baseado na composição química detectada, e em seguida compara essas informações a uma lista

de minerais pré-definida. As imagens digitais de resposta das partículas são construídas *pixel* por *pixel*, por meio de uma varredura completa da amostra, de maneira que são necessários milhares de medições de espectros de raios-X no processo para o mapeamento das partículas (Miller *et al.*, 1982 *apud* Carioca, 2014; Ferreira, 2013; Gonçalves, 2015).

Outra plataforma, amplamente utilizada nos estudos envolvendo a tecnologia mineral, é o *MLA (Mineral Liberation Analyzer)*, também da FEI Company. O *MLA* é um sistema de software e hardware *add-on* para um MEV como instrumento de medição automatizado nas pesquisas minerais. Foi desenvolvido como uma forma eficiente de combinar a análise de imagens de elétrons retroespalhados e análises de raios-X via EDS, para identificação do mineral e para a caracterização quantitativa de liberação mineral. As imagens de alta resolução geradas pelo MEV permitem ao *MLA* discriminar as fases minerais dentro de uma partícula, por meio de técnicas avançadas de análises de imagens, além de proporcionar a obtenção de dados como mineralogia modal, porosidade, tamanho e forma de grãos, associações mineralógicas e mapas texturais (Fandrich *et al.* 2007 *apud* Souza, 2014; Sylvester 2012 *apud* Souza, 2014; Carioca, 2014).

O *MLA* utiliza imagens de elétrons retroespalhados (BSE) para definir as partículas, de acordo com a intensidade dos diferentes tons de cinzas e adicionalmente pode categorizá-las pela sua composição, medida por pelo menos um espectrômetro de raios-X por dispersão de energia (EDS).

Costumeiramente, a preparação das amostras para análises no *MLA* consiste na impregnação das partículas em um molde (normalmente com 30mm de diâmetro) com resina epóxi para formar um bloco endurecido. Os tamanhos das partículas irão variar de acordo com a fração granulométrica estudada, variando de 1mm a 10 μ m normalmente. O corpo de prova é cortado, polido e posteriormente revestido com carbono antes de ser submetido a análise no MEV (Carioca, 2014).

Neste processo de preparação das seções polidas, algumas partículas podem se apresentar em um estado de aglomeração, com partículas em contato uma com as outras, podendo levar a resultados tendenciosos para a liberação mineral. A função de desaglomeração permite que sistema detecte os grupos de partículas aglomeradas e os separe de acordo com parâmetros pré-estabelecidos, como por exemplo a forma dos grãos (Fandrich *et al.* 2007 *apud* Souza, 2014).

Em seguida, o processo de segmentação das fases destaca as espécies minerais presentes na partícula e define seus limites com precisão a partir da distinção de regiões de tons de cinza homogêneos na imagem de elétrons retroespalhados. A intensidade do tom de cinza é diretamente proporcional ao número atômico médio que determina o número de elétrons retroespalhados emitidos pelo mineral. Como resultado do estágio de segmentação tem-se as partículas segmentadas com cada grão destacado por uma única cor (figura 3.27) (Souza, 2014).

As espécies minerais individualizadas na partícula são identificadas por meio da análise química via espectrometria de raios-X (EDS) pelas técnicas de análise por ponto, análise por área ou mapeamento por análise (Carioca, 2014). Os espectros gerados são comparados com espectros padrões de uma biblioteca dos minerais para produzir uma imagem classificada (figura 3.27).

O MLA opera com vários modos básicos de medição, sendo os mais utilizados denominados como XBSE (*extended BSE liberation analysis*) e o GXMAP (*grain X-ray mapping*). O modo XBSE (figura 3.28a) consiste em um método em que cada imagem BSE é coletada e segmentada para delinear os limites das fases minerais presentes na partícula, e então, no ponto central de cada grão identificado é feita uma análise via EDS (Souza, 2014; Sandmann, 2015). No modo GXMAP (figura 3.28b), além da coleta de um espectro de raios-X para cada fase segmentada pelo tom de cinza, uma ou mais fases, definidas por um intervalo de tom de cinza, é (são) selecionada(s) para que seja(m) mapeada(s) em detalhe. Nestes grãos são coletados diversos espectros via EDS, segundo uma malha pré-definida (Carioca, 2014; Sandmann, 2015).

A apresentação de todos os dados gerados na análise de *MLA* é feita em um software denominado de *Dataview*.

Atualmente, o *MLA* é amplamente utilizado para determinação do grau de liberação dos minerais e como instrumento para um maior detalhamento na caracterização mineral, incluindo composição química, identificação e quantificação das fases mineralógicas existentes e os intercrescimentos entre essas fases (Carioca, 2014).

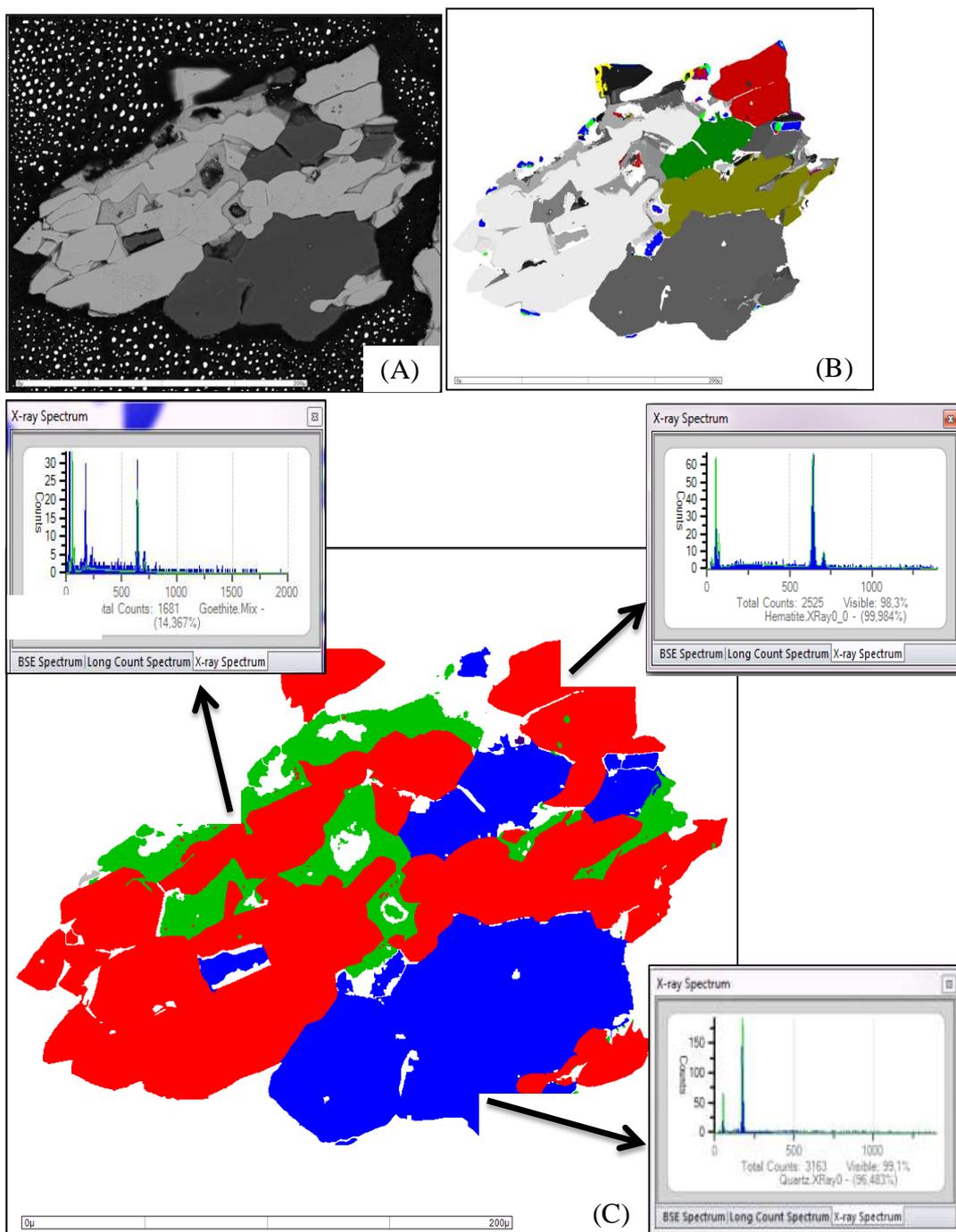


Figura 3.27 – (a) Imagem por elétrons retroespalhados. (b) Imagem de raios X. (c) Imagem com a partícula segmentada e os grãos identificados com diferentes cores, confirmado pela composição via EDS. Carioca (2014).

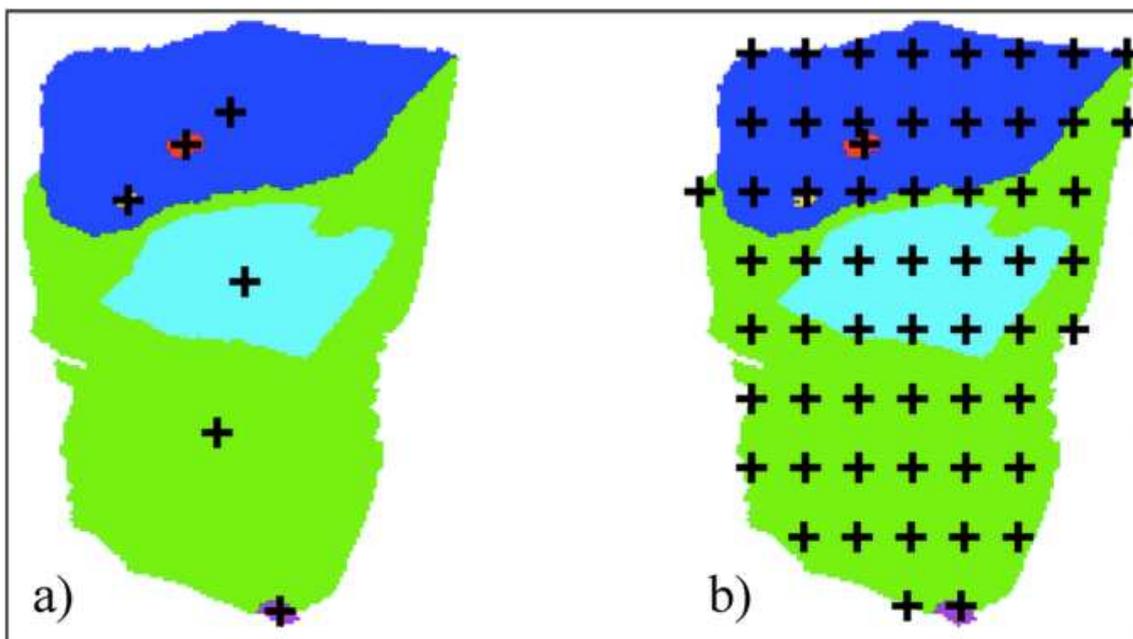


Figura 3.28 – (a): exemplo do modo de medição XBSE, com a aquisição de espectros de raios-X no *centroid* de cada fase segmentada. (b): exemplo do modo de medição GXMAP, com a aquisição de espectros de raios-X segundo uma malha pré-definida para as fases selecionadas de acordo com tons de cinza. (Sandmann, 2015).

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada no trabalho é descrita em três etapas: 1) definição, seleção, coleta e preparação das amostras, 2) fluxo de caracterização tecnológica com ensaios e testes em escala de bancada e 3) caracterização microestrutural com as análises químicas, mineralógicas, grau de liberação.

4.1 Seleção e coleta das amostras

As informações adquiridas pelos estudos dos minérios da reserva da Samarco ao longo dos anos, a partir de uma infinidade de caracterizações tecnológica e mineralógica em amostras de furos de sonda e amostras de frentes de lavra, fundamentou a decisão para seleção dos tipos de minérios que deveriam ser estudados neste trabalho. Os geólogos do planejamento de mina foram consultados e houve um consenso sobre quais os tipos deveriam ser priorizados nos estudos considerando os objetivos do trabalho e, conseqüentemente, quais amostras deveriam ser coletadas para o desenvolvimento da etapa experimental. Isto posto, foram selecionados cinco tipos de minério de ferro provenientes das jazidas de Alegria Norte e Alegria Sul da Samarco.

Para seleção dos pontos de amostragem foi feita uma consulta ao modelo geológico-tipológico de curto prazo e em seguida realizado um mapeamento nas minas para exata localização dos tipos de minério selecionados (figura 4.1). As amostras foram coletadas, com aproximadamente 300Kg cada, em corpos de minérios aflorantes, individualizáveis e mapeáveis na escala de 1:1000. Estas foram denominadas como "AGEO" (amostra de geometalurgia) e numeradas sequencialmente conforma a ordem de coleta e caracterização.

Todas as amostras são distintas entre si no que diz respeito a: gênese do minério, composição química, composição mineralógica, distribuição granulométrica, grau de liberação na fração retida em 0,15mm e/ou desempenho no teste de flotação em bancada considerando o teor de SiO₂ no concentrado.

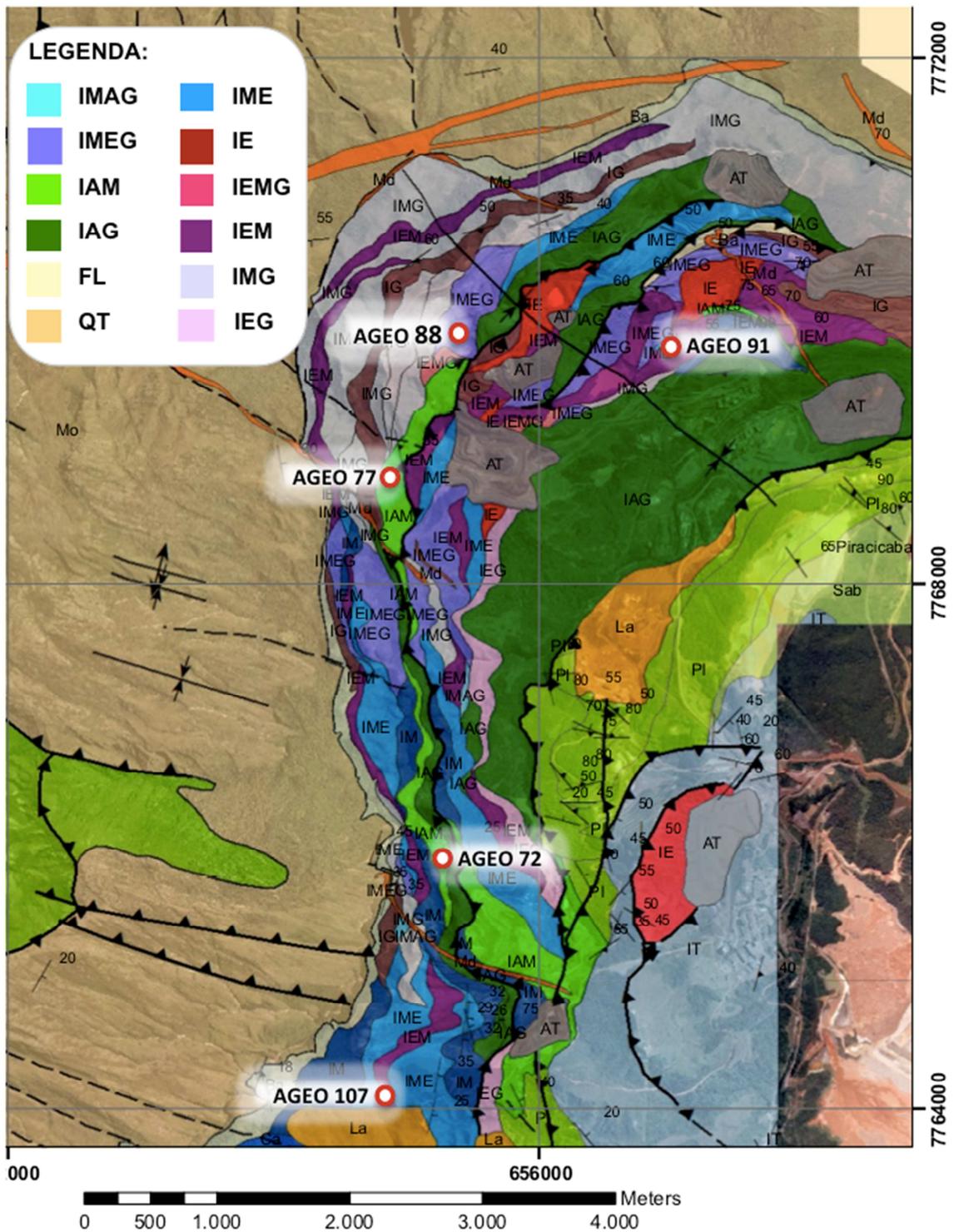


Figura 4.1 – Localização aproximada das amostras coletadas no mapa geológico-tipológico do Complexo Alegria, minas da Samarco Mineração.

Definiu-se que uma das amostras estudadas corresponderia a um tipo de minério que apresentasse bom desempenho no processo de beneficiamento, que de acordo com o

conhecimento prévio, seguramente oferecesse boas respostas às etapas de moagem e flotação. A intenção foi que as informações obtidas pela caracterização desta amostra fossem utilizadas como referência e base de comparação com as demais.

A amostra denominada como AGEO 88, foi a amostra selecionada como referência, sendo um exemplar de um tipo de minério normalmente presente na mina de Alegria Norte classificado como um itabirito martítico-especularítico-goethítico friável, apresentando os três minerais em proporções semelhantes na composição mineralógica. Este é um tipo de minério que apresenta uma coloração cinza fosco, sendo desmontado mecanicamente por trator, com fragmentação típica de chapinha e pó. O aspecto geral do minério *in situ* e após o desmonte pode ser observado na figura 4.2.

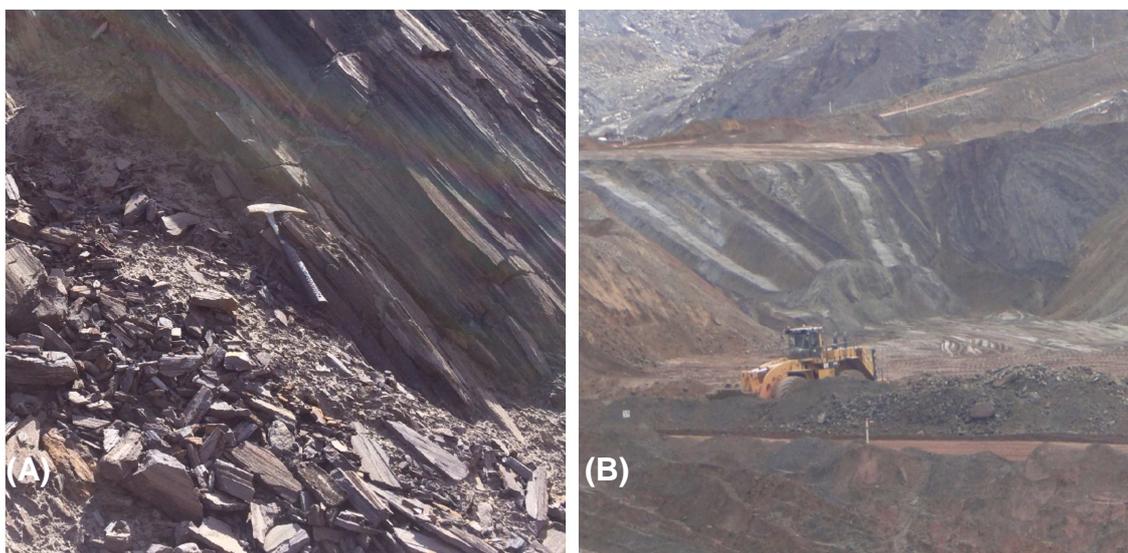


Figura 4.2 – (A) Detalhe do afloramento minério da AGEO 88. (B) Aspecto geral do minério da AGEO 88 após desmonte por trator.

As demais amostras coletadas referem-se a tipos de minérios que oferecem dificuldades ao processo de beneficiamento, seja na etapa de moagem pelo elevado requerimento energético e/ou baixo grau de liberação, seja na flotação por dificuldade de obtenção da qualidade do concentrado.

Em Alegria Norte a amostra de minério coletada e nomeada como AGEO 77, foi previamente identificada como sendo um itabirito anfibolítico-martítico compacto. Corresponde a um minério extremamente blocoso com fragmentos duros e maciços, que só é possível ser lavrado a partir do desmonte por explosivos. É um minério que

apresenta coloração típica castanha acinzentada com a composição mineralógica predominantemente por goethita e hematita martítica em proporções similares. Nas fotos apresentadas na figura 4.3 (A) e (B) é possível observar o aspecto geral deste minério após o processo de desmonte, com a grande quantidade de blocos gerados, constituindo fragmentos de tamanhos variados, desde centimétricos a métricos. As figuras 4.3 (C) e (D) exibem em detalhe os fragmentos deste minério, onde é possível perceber o grau de cimentação da rocha, constituída por uma matriz microcristalina, (granulação muito fina).



Figura 4.3 – (A) Aspecto geral do minério da AGEO 77 após o desmonte. (B) Detalhe dos blocos gerados após a detonação por explosivos. (C) e (D) Detalhe dos fragmentos demonstrando o alto grau de cimentação da rocha.

Também foi coletada uma amostra de itabirito anfibolítico-martítico na mina de Alegria Sul, denominada como AGEO 72. Ao contrário da AGEO 77, esta amostra corresponde a um minério semcompacto, portanto menos blocoso. O desmonte deste minério também é realizado por explosivos e os fragmentos gerados não são tão resistentes e maciços quanto aqueles gerados na AGEO 77. É possível observar níveis de maior alteração, com coloração mais amarelada (ocre). A escolha dessa amostra permitirá identificar e mapear possíveis diferenças entre os itabiritos

anfíbolíticos da reserva, dependendo do contexto geológico em que estejam condicionados. O aspecto geral do minério também é exibido na figura 4.4.



Figura 4.4 – (A) Aspecto geral do minério da AGEO 72 após desmonte por explosivo. (B) Detalhe de um fragmento do minério da AGEO 72.

Ainda em Alegria Sul foi coletado uma amostra de um minério típico desta mina, um exemplar de um itabirito especularítico-martítico semcompacto, denominada de AGEO 107. É um minério blocoso que também demanda desmonte por explosivos, porém, os fragmentos gerados são lamelares e mais frágeis, menos coesos, sendo possível em muitos casos destacar uma camada da outra manualmente e com pouco esforço. O minério apresenta uma coloração cinza azulada, com leve brilho (figura 4.5).

Foi selecionado ainda uma amostra de um tipo de minério, presente em uma porção da mina de Alegria Norte, que apresenta qualidade nobre considerando as variáveis tradicionalmente controladas na rotina do planejamento de mina e controle de qualidade. Porém, resultados prévios da caracterização tecnológica em bancada mostraram comportamento inesperado e totalmente anômalo na etapa de flotação. A AGEO 91 corresponde a este minério, sendo extremamente fino, com composição mineralógica predominantemente hematita martítica e coloração cinza arroxeada (figura 4.6).



Figura 4.5 – (A) e (B) Afloramento do minério da AGEO 107. (C) Aspecto do minério da AGEO 107 após desmonte por explosivos. (D) detalhe dos fragmentos (lamelares) gerados após desmonte.



Figura 4.6 – (A) e (B) Aspecto geral do minério da AGEO 91. (C) Detalhe do minério da AGEO 91 *in situ*. (D) Detalhe da fragmentação do minério.

4.2 Caracterização tecnológica

As cinco amostras foram caracterizadas segundo fluxograma apresentado na figura 4.7 no laboratório da SGS Geosol, localizado no distrito de Antônio Pereira-MG. Todos os ensaios descritos a seguir foram executados de acordo com os procedimentos adotados pelos laboratórios internos da Samarco e reproduzidos pela SGS Geosol.

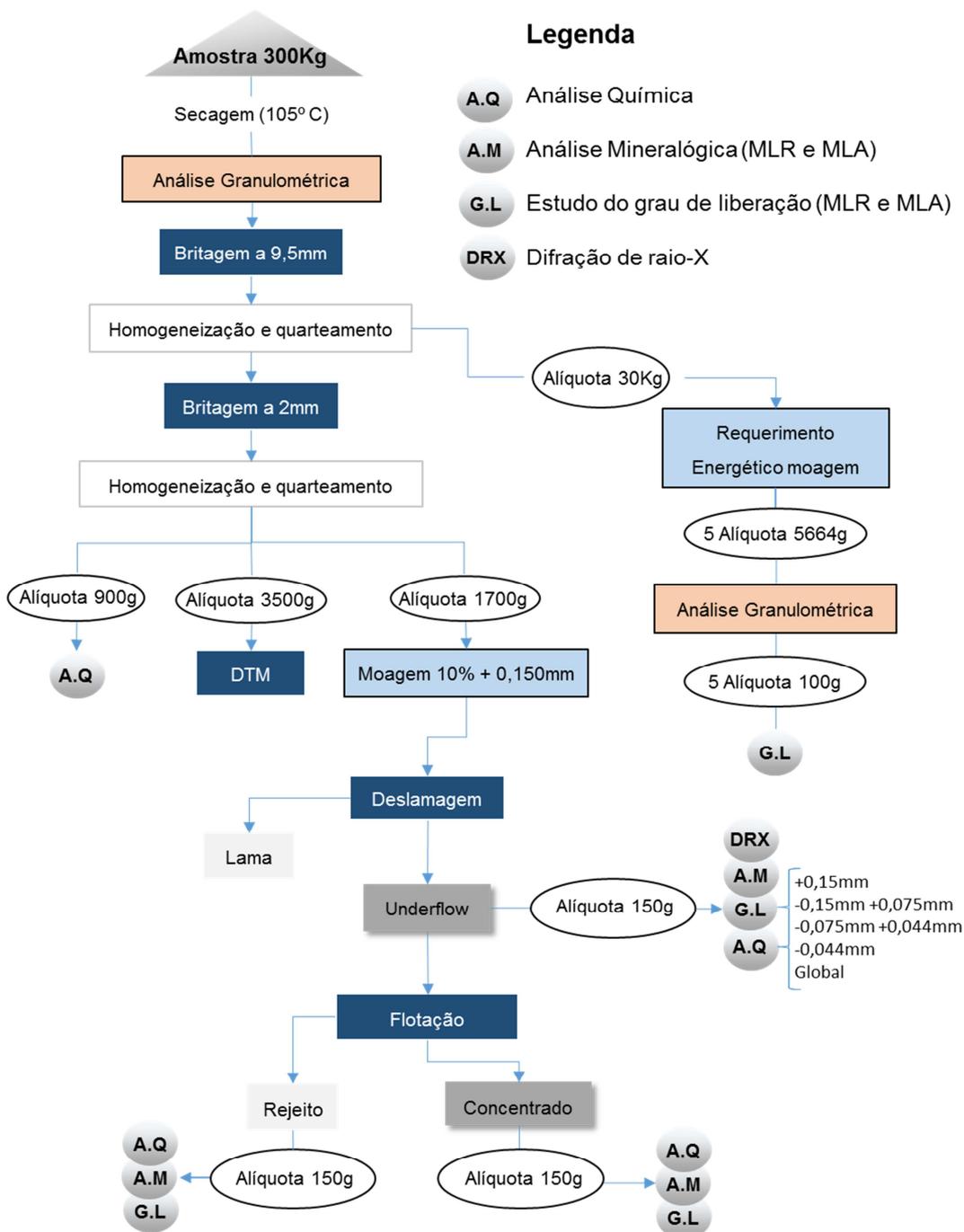


Figura 4.7 – Fluxograma de caracterização das amostras.

A preparação da amostra iniciou-se por um processo de secagem em estufa a 105° C. Em seguida toda a amostra foi submetida a análise granulométrica (figura 4.8). Primeiramente efetuou-se um peneiramento a 9,4mm onde o oversize (+9,4mm) foi encaminhado para a análise granulométrica da série grossa de peneiras enquanto que o undersize, o passante em 9,4mm, passou pela análise granulométrica séries média e fina.



Figura 4.8 – Fotos dos peneiradores vibratórios análise granulométrica série grossa (A) e séries média e fina (B).

Após a análise granulométrica, o oversize foi britado (figura 4.9-A) todo abaixo de 9,4mm em circuito fechado e em seguida incorporado ao restante da amostra. A amostra completa foi então homogeneizada e quarteada em um quarteador rotativo carrossel (figura 4.10A) para retirar uma alíquota de 30kg para encaminhar ao ensaio de requerimento energético de moagem (figura 4.11). Este ensaios foram realizados no laboratório de controle de processo (LCP) da engenharia de processo da Samarco.

O restante da amostra foi novamente britada, agora a 2mm (figura 4.9-B), e em seguida homogeneizada e quarteada em um quarteador rotativo carrossel (figura 4.10B) para obtenção de três alíquotas. Uma alíquota de 900g, que foi submetida a pulverização e encaminhada para análise química, que corresponderá a análise química do ROM. Outra alíquota de 3.500g foi obtida para o teste de DTM, determinação do tempo de moagem. Outra alíquota de 1.700g seguiu no fluxograma

de caracterização, sendo moída no tempo estipulado no ensaio do DTM, segundo especificação, de 10% do material retido em 0,15mm.

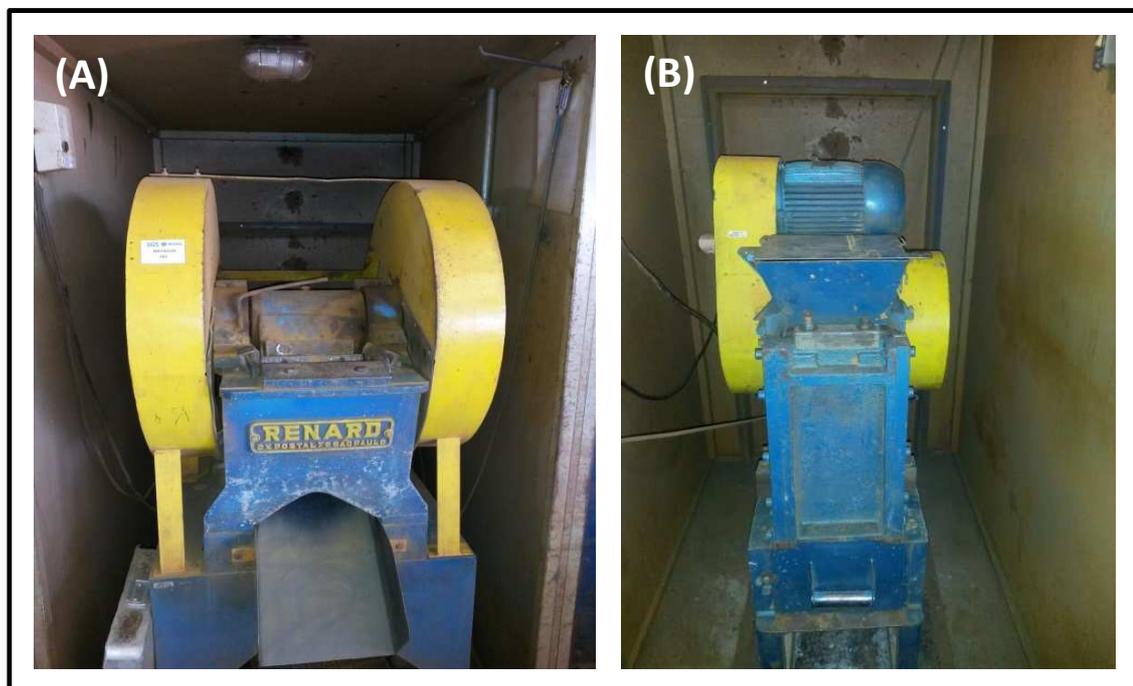


Figura 4.9 – Fotos dos britadores para 9,4mm (A) e 2mm (B).

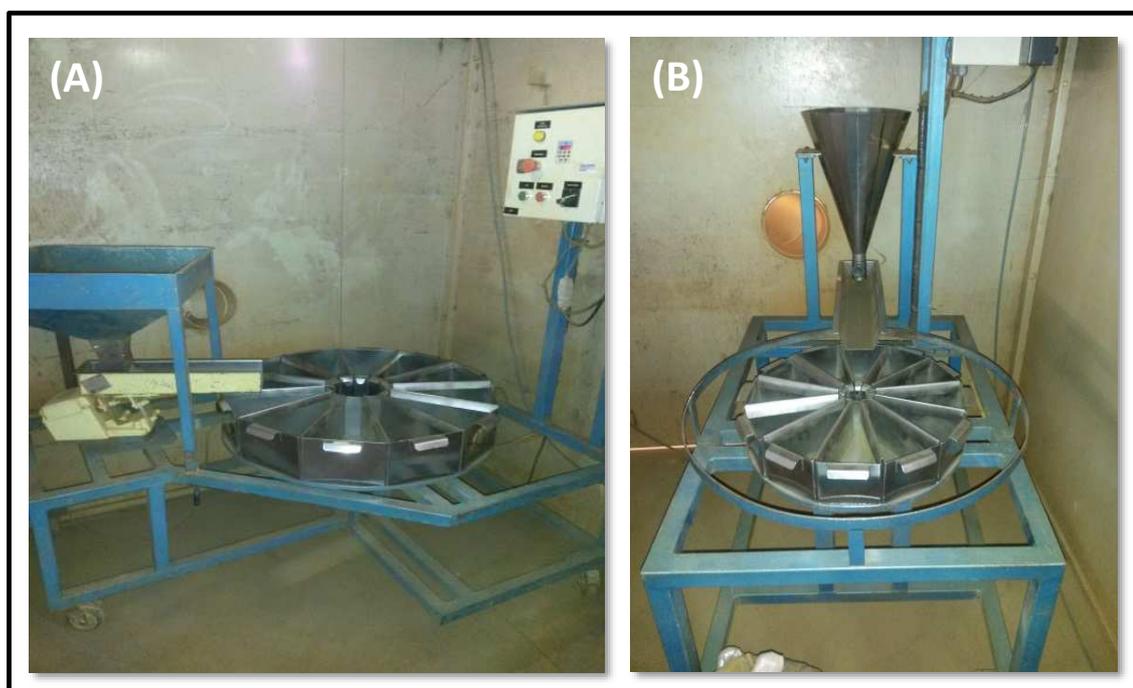


Figura 4.10 – Fotos do quarteador rotativo tipo carrossel para diferentes produtos, britado em 9,4mm (A) e britado em 2,0mm (B).



Figura 4.11 – Foto do moinho 30,5cm X 30,5cm (12x12”) utilizado no ensaio de requerimento energético.

A amostra moída foi submetida ao teste de deslamagem (figura 4.12), com objetivo de retirar a lama (fração < 0,010mm). A lama (overflow) foi direcionada para análise química enquanto que o underflow foi encaminhado para um quarteador de polpas de forma a retirar uma alíquota de 150g para análises química, mineralógica e do grau de liberação. Esta alíquota corresponde à “alimentação da flotação”.

O underflow foi encaminhado para o teste de flotação (figura 4.13). Dos produtos da flotação, rejeito e concentrado, foram retiradas alíquotas de 150g para análises química, mineralógica e grau de liberação.



Figura 4.12– Fotos da cuba de deslamagem e agitador mecânico.



Figura 4.13– Fotos da célula de flotação.

4.2.1 Análise granulométrica

Todas as amostras foram submetidas a análise granulométrica do ROM, a seco e a úmido, segundo as séries de peneiras Tyler com as seguintes aberturas: 1) série grossa com peneiras de 150mm (6"), 125mm (5"), 100mm (4"), 75mm (3"), 50mm (2"), 25mm (1"), 12,5mm (1/2"), 9,4mm (3/8"), 8mm (5/16"); 2) série média, com as peneiras 6,3mm (1/4"), 4,76mm (4#), 3,36mm (6#), 2,36mm (8#), 1,70mm (10#), 1,18mm (14#), 0,85mm (20#) , 0,60mm (28#), 0,425mm (35#); 3) série fina, com as peneiras 0,300mm (48#), 0,210mm (65#), 0,15mm (100#), 0,105mm (150#), 0,075mm (200#), 0,053mm (270#), 0,044mm (325#).

4.2.2 Requerimento energético de moagem

O ensaio de requerimento energético de moagem foi realizado segundo procedimento descrito em Donda (2003) e Donda e Rosa (2014). A alíquota de 30kg da amostra, já britada em 9,4mm, foi homogeneizada e quarteada para obtenção de cinco alíquotas, sendo uma alíquota de 1.000g para realização da análise granulométrica que corresponde à alimentação da moagem (tempo zero), e outras quatro alíquotas de 5.664g que foram moídas em diferentes tempos de acordo com o procedimento do ensaio.

Os ensaios de requerimento energético de moagem foram realizados em um moinho 30,5cm X 30,5cm (12x12") (figura 4.10) com rotação ajustada para 53,5 RPM.

Para realização dos ensaios foi necessário compor uma carga de corpos moedores (bolas) com massa total de aproximadamente 30.569g, e escalonada da seguinte forma: 20 bolas de 25 a 29,99mm; 10 bolas de 35 a 39,99mm; 09 bolas de 40 a 44,99mm; 05 bolas de 45 a 49,99mm; 16 bolas de 50 a 54,99mm; 03 bolas de 55 a 59,99mm e 10 bolas de 60 a 64,99mm. O escalonamento correto dos corpos moedores é fundamental para manter o padrão dos testes e garantir a confiabilidade dos resultados.

As quatro alíquotas já preparadas em polpa a 80% de sólidos foram submetidas à moagem nos tempos de 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos e 20 minutos.

Após cada moagem, tanto as bolas quanto o moinho foram lavados de modo a retirar todo o minério. Todo o material foi filtrado e seco. Em seguida a amostra foi desagregada em uma peneira de 1mm (16#) e, depois, utilizando toda a amostra, foi determinado o percentual retido em 0,15mm (100#).

Os cinco valores dos percentuais retidos em 0,15mm (100#) correspondentes ao tempo zero e às quatro moagens, foram lançados em um gráfico, sendo no eixo das abscissas o valor do consumo energético em kWh/t e no eixo das ordenadas o percentual retido na malha de 0,15mm, conforme gráfico de exemplo da figura 4.14. O ajuste da curva em exponencial fornece a fórmula para cálculo do consumo específico de energia necessário para moer a amostra até 10% retido em 0,15mm.

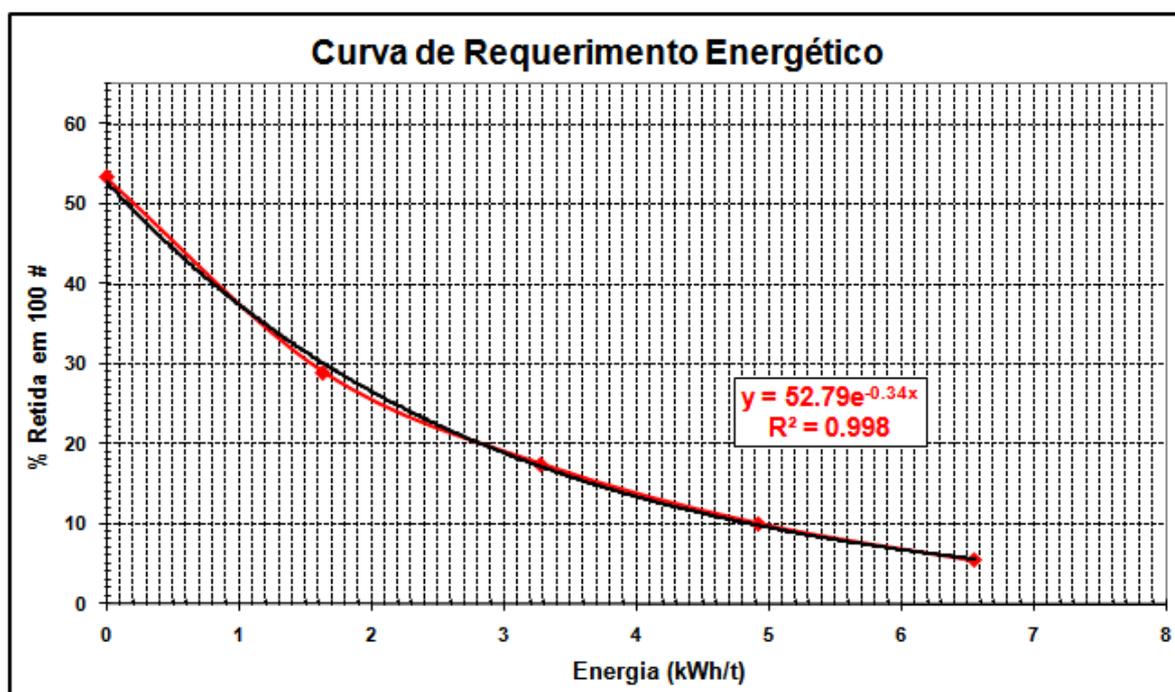


Figura 4.14 – Resultado do ensaio de requerimento energético com a curva exponencial ajustada. O valor de energia é calculado considerando 10% retido em 150 μ m.

As frações retida e passante em 0,15mm de cada uma das alíquotas, alimentação da moagem e das quatro alíquotas moídas, foram encaminhadas para análise do grau de liberação. Para composição da fração +0,15mm foi necessário fragmentar em um gral metálico todo o material retido em 0,425mm (35#).

4.2.3 Moagem

Para alimentar a etapa de flotação, a amostra foi moída no tempo determinado para a especificação granulométrica de 10% retido na malha de 0,15mm, de acordo com os resultados de determinação do tempo de moagem (DTM).

4.2.4 Deslamagem

Todo minério moído a 10% retido em 0,15mm é encaminhado para a deslamagem, com objetivo de retirar a fração abaixo de 0,010mm. O ensaio é realizado em uma cuba de PVC de 4000ml com pH ajustado a 10,5.

Todo o minério é colocado na cuba e o volume de 4000ml completado com água deionizada. O material é agitado utilizando-se um plunger e o pH corrigido para 10,5 com adição de hidróxido de sódio com concentração de 3%. O material é agitado continuamente até que esteja completamente em suspensão.

Ao cessar a agitação, é cronometrado 5 minutos para começar a sinfonar o material em suspensão até o volume de aproximadamente 1cm acima do material sedimentado.

Em seguida, repete-se o procedimento por mais duas vezes, completando o volume com água deionizada até 4000ml entre um teste e outro.

O underflow é então filtrado para ser encaminhado ao teste de flotação. Antes disso, o material é homogeneizado para a retirada de três alíquotas para submeter a análise química, mineralógica e determinação do grau de liberação.

4.2.5 Flotação

Os ensaios de flotação catiônica reversa foram realizado em célula de bancada Wemco de 2400ml com rotação de 1300 RPM. Como reagentes da flotação são utilizados o griz de milho gelatinizado com soda cáustica (NaOH) na proporção 5:1 ou amido de mandioca, como depressor dos minerais de ferro, a etermonoamina

misturada à eterdiamina na proporção 1:1 como coletor da ganga. Em todos os testes é utilizada água nova.

A polpa de minério a 50% de sólido é adicionada à célula com adição de 1500ml de água. Em estado de agitação adiciona-se o volume de amido na dosagem desejada, de acordo com a tabela IV.1 e condiciona-se por cinco minutos. Em seguida, adiciona-se mais 600ml de água. O pH deve ser ajustado para 10,5 com solução de soda. O volume de amina é acrescentada conforme dosagem apresentada na tabela IV.1. É necessário aguardar um minuto para condicionamento. Por fim, a válvula de ar da célula é aberta e inicia-se a flotação, com remoção mecânica da espuma por três minutos, utilizando-se espátulas adequadas.

Tabela IV.1 – Dosagens de reagentes para o ensaio de flotação.

Faixas de dosagens padrão (g/t)		
Teores de Ferro	Amido	Amina
60-62	700	23
58-60	650	26
56-58	600	30
54-56	550	35
52-54	500	40
50-52	475	45
48-50	450	50
46-48	400	55
44-46	350	60
42-44	325	63
40-42	300	65
38-40	275	68

4.3 Caracterização microestrutural

4.3.1 Análises químicas

As análises químicas das alíquotas do ROM, da lama e underflow da deslamagem, do rejeito e concentrado da flotação, serão realizadas por diferentes métodos de acordo com o elemento químico desejado:

- Fe total e FeO – determinados por dicromatometria (método do cloreto de titânio). O tratamento da amostra segue quatro etapas: ataque ácido, redução

de ferro por estanho, oxidação do estanho por titânio e oxidação de titânio por dicromato.

- PPC – Deverá ser determinada por gravimetria, com secagem em estufa a 105°C durante 1 hora antes da primeira pesagem. A calcinação deve prosseguir em forno mufla a 1000°C, retiradas da mufla as amostras devem ser colocadas em dissecadora durante 40 minutos antes da segunda pesagem.
- Al_2O_3 , P, MnO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 , MgO, CaO e K_2O – determinar por espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado (ICP-OES).
- SiO_2 – para teores até 7,00%, determinar via ICP. Para teores superiores a 7,00%, determinar por diferença segundo equação de fechamento estequiométrico.

4.3.2 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica das amostras foi realizada por técnicas complementares, por meio do microscópio de luz refletida (MLR), difração de raios-X e via MLA. Foram realizadas análises nas alíquotas do underflow da deslamagem, do concentrado e do rejeito da flotação.

A microscopia de luz refletida foi utilizada para identificação e quantificação modal por estimativa de área das fases mineralógicas, considerando os óxidos e oxi-hidróxidos de ferro (hematita especular, hematita martítica, goethita e magnetita) e os minerais de ganga, principalmente o quartzo. A quantificação das fases em peso foi determinada a partir da densidade dos respectivos minerais. Durante cada análise mineralógica foi utilizada uma mesma lente objetiva e um mesmo espaçamento no grid para a contagem, totalizando no mínimo de 500 partículas. As análises foram realizadas no laboratório da SGS Geosol, unidade de Antônio Pereira, segundo procedimento interno de análise adotado pela Samarco. Os resultados são apresentados normalizados considerando somente os óxidos/hidróxido de ferro, sendo identificados e quantificados os seguintes minerais e feições: hematita especular, hematita martítica, goethita, incluindo suas diversas formas, terrosa, maciça, botrioidal, e a magnetita.

O grau de liberação mineral do quartzo e dos óxidos e oxi-hidróxido e a distribuição dos tipos de partículas mistas e livres foram determinados de acordo com o método

proposto por Pereira (2009), descrito no item 3.8. Esses dados foram levantados para as alíquotas globais da alimentação da flotação, do concentrado e rejeito da flotação e para as frações +0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm, desses mesmos produtos. Todo o estudo do grau de liberação via microscopia ótica de luz refletida foi realizado na Open Brasil & Associates.

A difratometria de raios-X foi utilizada para análise quantitativa para amostras em pó das alíquotas globais da alimentação da flotação, do concentrado e do rejeito da flotação. As análises foram conduzidas no Laboratório de Análises por Raios-X do Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia, UFMG, em um difratômetro de raios-X para amostras em pó, marca Philips, sistema X'Pert-APD, controlador PW 3710/31, gerador PW 1830/40, goniômetro PW 3020/00 e tubo de anodo de cobre.

O *MLA* foi empregado na determinação do grau de liberação do quartzo e dos óxidos/hidróxido de ferro para um maior detalhamento na caracterização mineral, incluindo identificação e quantificação das fases mineralógicas existentes, o grau de liberação do quartzo, curvas de espectro de liberação do quartzo e dos óxidos/hidróxido de ferro, composição química modal, distribuição química elementar por fase mineral identificada, estudo das associações mineralógicas, distribuição do tamanho de partículas e distribuição do tamanho dos grãos. A aquisição dos dados ocorreu no modo GXMAP, com a coleta de espectros de raios-X, segundo uma malha de pré-definida, para cada fase segmentada pelo tom de cinza e classificada como sendo goethita ou hematita/magnetita.

Para o cálculo de liberação do quartzo, foram consideradas como partículas livres de quartzo aquelas com mais de 90% de quartzo em sua composição mineralógica e não são consideradas no cálculo as partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro. Na quantificação das partículas mistas foi considerada a proporção média do teor de quartzo na composição das partículas mistas, determinada pelo *MLA*. Por exemplo, na AGEO 88, para a classe de composição do quartzo de $5\% < x \leq 10\%$ foram contabilizadas 14 partículas com proporção média de quartzo de 8,83% na composição das partículas.

Os estudos no *MLA* foram realizados com as mesmas seções polidas previamente utilizadas na microscopia ótica, considerando as alíquotas globais da alimentação da flotação, do concentrado e do rejeito da flotação. Os estudos foram realizados no Centro de Microscopia da UFMG (EM-UFMG) utilizando-se o sistema *MLA 650*,

acoplado a um MEV-FEG modelo Quanta 650 da FEI, equipado com analisador EDS modelo Quantax da Bruker (figura 4.15).

O MLA dentre suas diversas vantagens sobre a microscopia ótica de luz refletida, apresenta uma limitação para distinguir as diversas morfologias da hematita, por exemplo, hematita especular da hematita martítica, e para diferenciar as hematitas da magnetita. A hematita e a magnetita apresentam número atômico médio muito próximo, produzindo imagens com tonalidade de cinza aproximada e, além disso, os espectros de raios-X são muito semelhantes pois os teores de ferro e oxigênio são similares. Desta forma, a composição mineralógica apresentada pelas análises do MLA considerarão hematitas + magnetita, goethita e quartzo como minerais predominantes, além de outras fases que ocorrem em proporções muito baixas nas amostras estudadas.

A grande vantagem do MLA é a possibilidade da análise de um número muito grande de partículas, o que garante um significado estatístico de enorme valor.

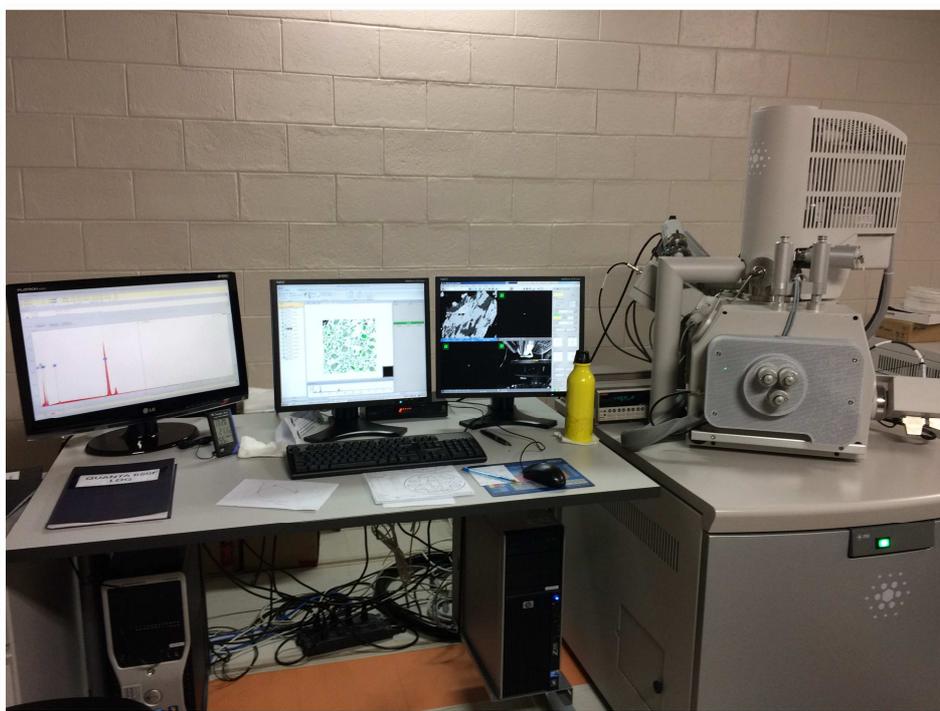


Figura 4.15 – Imagem do sistema MLA do Centro de Microscopia da UFMG.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização tecnológica e nas análises química e mineralógica de cada uma das amostras. A apresentação dos resultados segue as etapas do fluxograma de caracterização adotado no estudo e exibido na figura 4.1. A discussão dos resultados acontece à medida em que os dados são apresentados, para que o entendimento seja construído ao longo do processo de caracterização até a qualidade final do concentrado, com o grau de liberação do quartzo como foco principal.

5.1 Distribuição granulométrica

Todas as amostras, após a secagem, foram submetidas à análise granulométrica nas séries grossa, média e fina da sequencia de peneiras Tyler. Os resultados são apresentados nas curvas granulométricas da figura 5.1 e nos dados das tabelas V.1 (A), (B), (C), (D) e (E).

Nas curvas granulométricas das amostras tal e qual, apresentadas na figura 5.1, é possível observar que os minérios estudados apresentam distribuições granulométricas distintas.

É notável que a AGEO 77 corresponde à amostra com a granulometria mais grossa, em todas as frações analisadas. Segundo resultados da análise granulométrica apresentados nas tabelas V.1, é possível constatar que este é um minério compacto, pois 84,6% da amostra está retida em 9,4mm (tabela V.1), de acordo com o critério utilizado na Samarco que baseia a classificação quanto à compacidade no retido mássico acumulado na malha de 9,4mm (3/8”), citado no item 3.5.

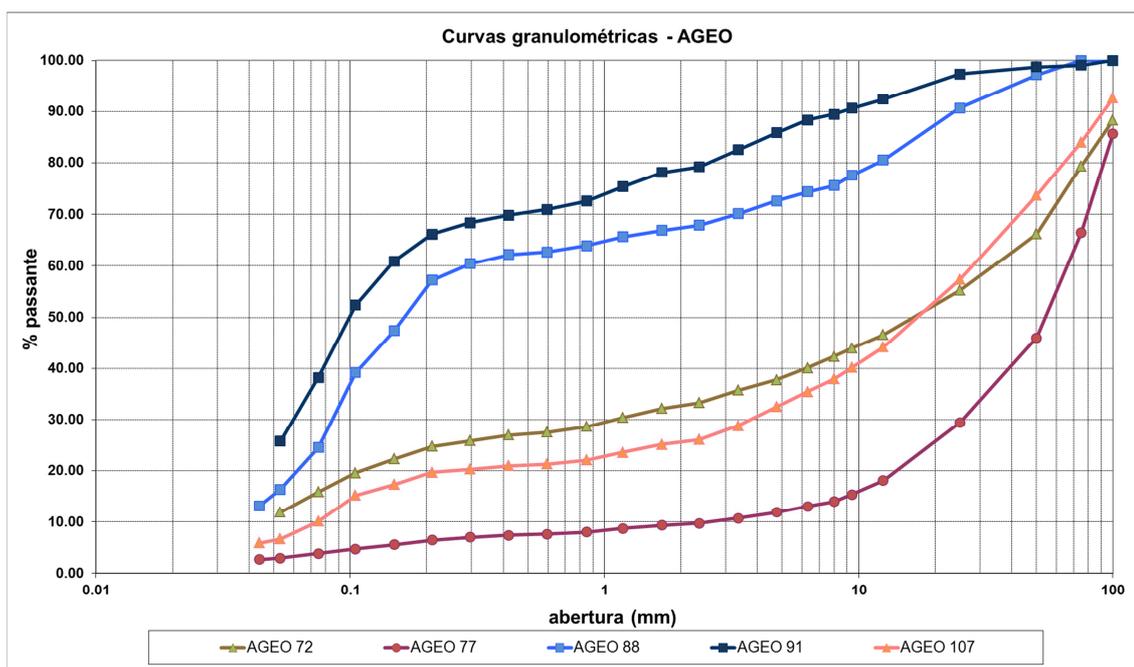


Figura 5.1 – Gráfico de distribuição granulométrica das amostras tal e qual para a séries de peneiras Tyler.

As amostras AGEO 72 e AGEO 107 também correspondem a minérios bastante grosseiros, apesar de mais finos do que o minério da AGEO 77. O minério da AGEO 107 apresenta granulometria mais grossa do que a AGEO 72 em praticamente todas as frações analisadas, exceto nas frações maiores, entre 25mm e 100mm, onde a AGEO 72 é mais grosseira do que a AGEO 107. Essas amostras são classificadas como minérios semicompactos visto que o retido em 9,4mm é praticamente 60% para ambas (tabela V.1).

Os minérios das amostras AGEO 88 e AGEO 91 são extremamente finos, sendo que a AGEO 91 pode ser considerada como pulverulenta, visto que o retido em 9,4mm é de apenas 9,4%. A AGEO 88, que corresponde a amostra de referencia nos estudos, é classificado como um minério friável com retido em 9,4mm igual a 22,5% (tabela V.1).

Considerando a especificação da moagem primária do circuito de beneficiamento da Samarco, 10% retido em 0,15mm, é possível notar que todas as amostras deverão ser moídas. A AGEO 91 é a amostra com menor valor do retido em 0,15mm, com apenas 39,1% da amostra acima desta fração. A AGEO 88 apresenta mais de 50% da amostra retida em 0,15mm enquanto que as amostras mais blocosas, AGEO 107 e

AGEO 72, apresentam mais de 75% do material retido em 0,15mm. Destaca-se a AGEO 77 que apresenta mais de 90% do material que a compõe retido em 0,15mm, o que pode indicar maior dificuldade deste minério na etapa de moagem.

Tabela V.1 – Análises granulométricas, séries de peneiras grossa, média e fina, das amostras: (A) AGEO 72, (B) AGEO 77, (C) AGEO 88, (D) AGEO 91, (E) AGEO 107.

(A)

AGEO 72				
Malha Tyler	Abertura mm	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante
6"	150	0,0	0,0	100,0
5"	125	0,0	0,0	100,0
4"	100	11,7	11,7	88,3
3"	75	8,9	20,7	79,4
2"	50	13,1	33,8	66,3
1"	25	11,0	44,7	55,3
1/2"	12,5	8,7	53,4	46,6
3/8"	9,4	2,7	56,1	43,9
5/16"	8,0	1,6	57,7	42,3
1/4"	6,3	2,2	60,0	40,0
4#	4,8	2,3	62,3	37,7
6#	3,4	2,1	64,4	35,6
8#	2,4	2,5	66,8	33,2
10#	1,7	1,1	67,9	32,1
14#	1,18	1,8	69,7	30,3
20#	0,85	1,8	71,5	28,5
28#	0,60	1,1	72,6	27,4
35#	0,42	0,6	73,2	26,9
48#	0,30	1,1	74,3	25,8
65#	0,21	1,1	75,4	24,7
100#	0,15	2,5	77,8	22,2
150#	0,105	2,7	80,6	19,5
200#	0,075	3,7	84,3	15,8
270#	0,053	4,0	88,2	11,8
325#	0,044	1,4	89,6	10,4
-325#	0,044	10,5	100,1	0,0

(B)

Ageo 77				
Malha Tyler	Abertura mm	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante
6"	150	0,0	0,0	100,0
5"	125	0,0	0,0	100,0
4"	100	14,4	14,4	85,7
3"	75	19,1	33,5	66,5
2"	50	20,5	54,0	46,0
1"	25	16,6	70,6	29,4
1/2"	12,5	11,3	81,9	18,1
3/8"	9,4	2,8	84,6	15,4
5/16"	8,0	1,3	86,0	14,0
1/4"	6,3	1,0	87,0	13,0
4#	4,8	1,2	88,1	11,9
6#	3,4	1,1	89,3	10,7
8#	2,4	1,0	90,3	9,7
10#	1,7	0,4	90,7	9,3
14#	1,18	0,6	91,3	8,7
20#	0,85	0,7	92,0	8,0
28#	0,60	0,4	92,4	7,6
35#	0,42	0,2	92,6	7,4
48#	0,30	0,4	93,0	7,0
65#	0,21	0,5	93,5	6,5
100#	0,15	0,9	94,4	5,6
150#	0,105	0,8	95,2	4,8
200#	0,075	0,9	96,2	3,8
270#	0,053	0,9	97,1	2,9
325#	0,044	0,3	97,3	2,7
-325#	0,044	2,7	100,0	0,0

(C)

Ageo 88				
Malha Tyler	Abertura mm	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante
6"	150	0,0	0,0	100,0
5"	125	0,0	0,0	100,0
4"	100	0,0	0,0	100,0
3"	75	0,0	0,0	100,0
2"	50	2,8	2,8	97,2
1"	25	6,5	9,3	90,7
1/2"	12,5	10,1	19,4	80,6
3/8"	9,4	3,0	22,5	77,5
5/16"	8,0	2,0	24,4	75,6
1/4"	6,3	1,2	25,7	74,3
4#	4,8	1,7	27,4	72,6
6#	3,4	2,5	29,9	70,1
8#	2,4	2,2	32,1	67,9
10#	1,7	1,0	33,1	66,9
14#	1,18	1,2	34,3	65,7
20#	0,85	1,7	36,0	64,0
28#	0,60	1,2	37,3	62,7
35#	0,42	0,5	37,8	62,2
48#	0,30	1,7	39,5	60,5
65#	0,21	3,2	42,7	57,3
100#	0,15	9,9	52,6	47,4
150#	0,105	8,2	60,8	39,2
200#	0,075	14,6	75,5	24,5
270#	0,053	8,2	83,6	16,4
325#	0,044	3,2	86,9	13,1
-325#	0,044	13,1	100,0	0,0

(D)

AGEO 91				
Malha Tyler	Abertura mm	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante
6"	150	0,0	0,0	100,0
5"	125	0,0	0,0	100,0
4"	100	0,0	0,0	100,0
3"	75	0,9	0,9	99,1
2"	50	0,4	1,3	98,7
1"	25	1,4	2,7	97,3
1/2"	12,5	4,9	7,6	92,4
3/8"	9,4	1,8	9,4	90,7
5/16"	8,0	1,2	10,5	89,5
1/4"	6,3	1,1	11,6	88,4
4#	4,8	2,5	14,1	85,9
6#	3,4	3,3	17,5	82,6
8#	2,4	3,3	20,8	79,2
10#	1,7	1,1	21,9	78,1
14#	1,18	2,8	24,7	75,4
20#	0,85	2,8	27,4	72,6
28#	0,60	1,7	29,1	70,9
35#	0,42	1,1	30,2	69,8
48#	0,30	1,4	31,6	68,4
65#	0,21	2,2	33,8	66,2
100#	0,15	5,3	39,1	60,9
150#	0,105	8,6	47,7	52,4
200#	0,075	14,1	61,8	38,2
270#	0,053	12,5	74,3	25,8
325#	0,044	3,1	77,3	22,7
-325#	0,044	22,7	100,0	0,0

(E)

Ageo 107				
Malha Tyler	Abertura mm	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante
6"	150	0,0	0,0	100,0
5"	125	0,0	0,0	100,0
4"	100	7,4	7,4	92,6
3"	75	8,6	16,0	84,0
2"	50	10,4	26,3	73,7
1"	25	16,3	42,6	57,4
1/2"	12,5	13,2	55,9	44,1
3/8"	9,4	3,9	60,0	40,0
5/16"	8,0	2,2	62,2	37,8
1/4"	6,3	2,5	64,7	35,3
4#	4,8	2,9	67,7	32,3
6#	3,4	3,7	71,4	28,6
8#	2,4	2,7	74,1	25,9
10#	1,7	0,9	75,0	25,0
14#	1,18	1,6	76,6	23,4
20#	0,85	1,5	78,1	21,9
28#	0,60	0,8	78,9	21,1
35#	0,42	0,3	79,2	20,8
48#	0,30	0,7	79,9	20,1
65#	0,21	0,6	80,5	19,5
100#	0,15	2,4	82,8	17,2
150#	0,105	2,2	85,0	15,0
200#	0,075	5,1	90,1	9,9
270#	0,053	3,4	93,5	6,5
325#	0,044	0,8	94,3	5,7
-325#	0,044	5,9	100,2	0,0

Destaque nos dados das tabelas acima para as frações 9,4mm, que corresponde à malha de controle para classificação do minério quanto a compacidade, fração 0,15mm que é a especificação da moagem e a fração 0,044mm que é especificação da remoagem, um item de controle do concentrado produzido, visando o transporte por mineroduto.

Todas as amostras foram britadas abaixo de 9,4mm em circuito fechado. As curvas da distribuição granulométrica dos minérios britados a 9,4mm em comparação à amostra tal e qual são apresentadas nas figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5.

A AGEO 77 quando britada a 9,4mm apresenta uma redução considerável da granulometria nas frações maiores, principalmente nas frações entre 1,18mm a 8mm, quando comparada à amostra tal e qual. O percentual passante em 4,8mm aumenta de 11,86% da amostra tal e qual para 76,9% quando britada. Já nas frações mais finas, a redução é mais suave, por exemplo, na fração 0,15mm o percentual passante aumenta de 5,56% da amostra tal e qual para 21,9% quando britada.

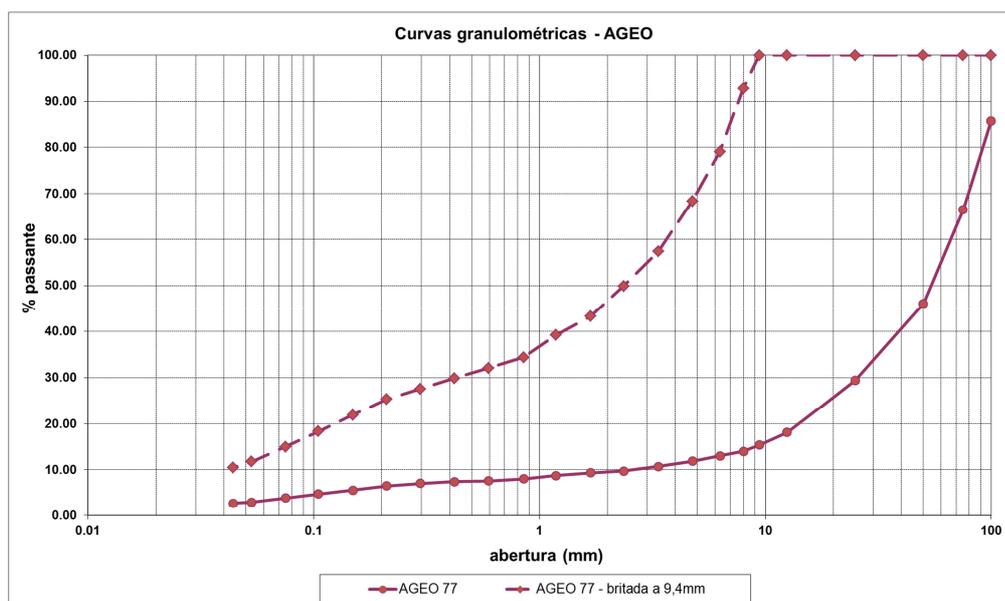


Figura 5.2 – Gráfico de distribuição granulométrica da AGEO 77 considerando a amostra tal e qual e britada a 9,4mm.

A AGEO 77, mesmo quando britada a 9,4mm, apresenta distribuição granulométrica mais grosseira nas frações menores do que 6,3mm do que as amostras tal e qual AGEO 88 e AGEO 91 (figura 5.3).

Nas frações abaixo de 0,85mm, a curva granulométrica da AGEO 77 britada a 9,4mm, é praticamente idêntica à amostra tal e qual da AGEO 72 (figura 5.3). É importante destacar que o minério da AGEO 77 e da AGEO 72 são definidos como anfíbolíticos-martíticos e uma das principais diferenças entre eles é a compactidade, sendo o minério da AGEO 77 compacto e da AGEO 72 semicompacto. Este fato permite constatar que o minério da AGEO 77 é, além de extremamente blocoso, muito resistente ao processo de fragmentação, principalmente nas frações mais finas onde a redução de tamanho foi menos expressiva.

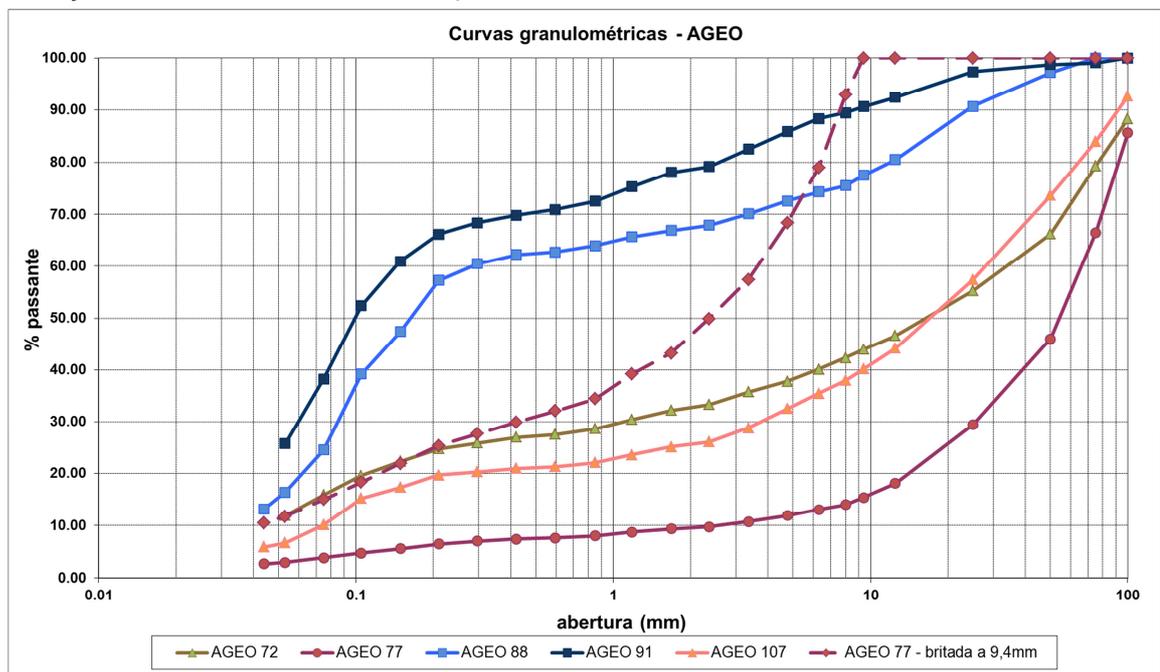


Figura 5.3 – Gráfico de distribuição granulométrica de todas as amostras tal e qual em comparação à distribuição granulométrica da AGEO 77 britada a 9,4mm.

O gráfico da figura 5.4 mostra as curvas granulométricas das amostras tal e qual e britadas em 9,4mm das AGEO 72 e 107. Após britagem em 9,4mm, as amostras apresentam redução granulométrica mais expressiva nas frações medianas e grosseiras, acima de 1,18mm. Nas frações mais finas, abaixo de 105mm a redução foi pouco expressiva, mostrando que esses minérios também oferecem resistência considerável ao processo de redução de tamanho.

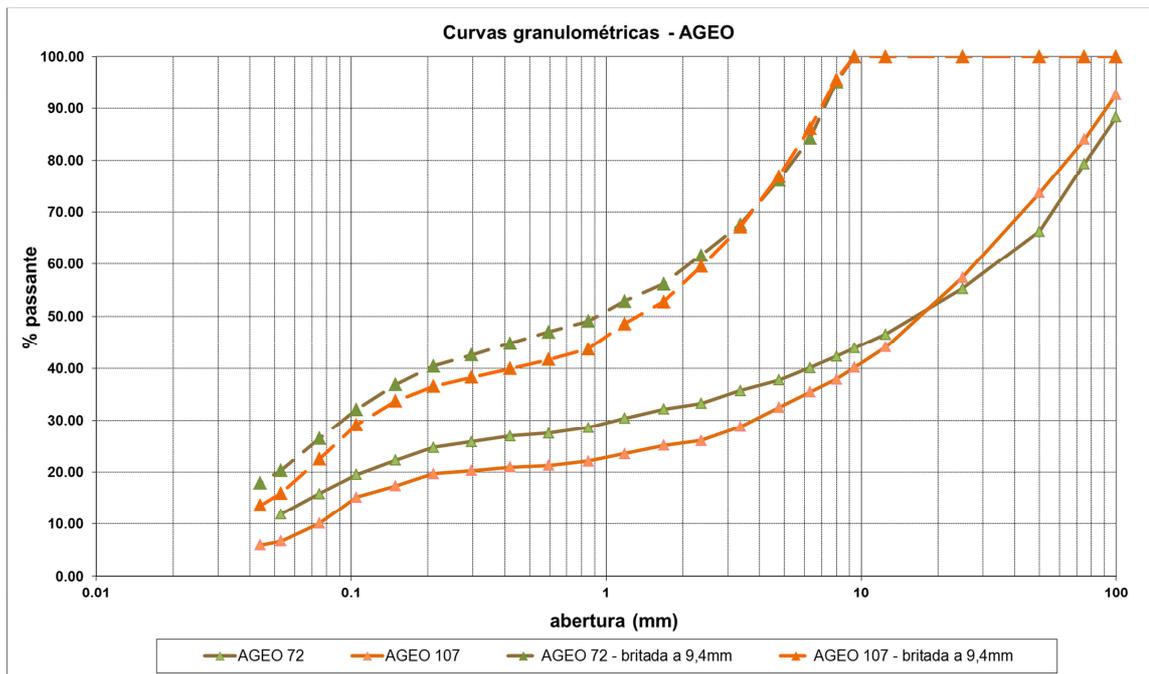


Figura 5.4 – Gráfico de distribuição granulométrica das AGEO 72 e AGEO 107 considerando a amostra tal e qual e britada a 9,4mm.

Na figura 5.5 é possível observar as curvas granulométricas das AGEO 88 e AGEO 91 para as amostras tal e qual e depois de britadas em 9,4mm. O minério da AGEO 88 apresentou redução granulométrica pelo processo de britagem, por exemplo, houve aumento do percentual passante em 0,15mm de 47,3% para 73%. Já para o minério da AGEO 91, as distribuições granulométricas são praticamente as mesmas para as amostras tal e qual e britada a 9,4mm. Como o minério já é naturalmente muito fino, com praticamente todo o material que compõe a amostra passante em 9,4mm, o processo de britagem praticamente não alterou a distribuição granulométrica o minério. Com isso, ao final da britagem em 9,4mm, o minério da AGEO 88 tornou-se mais fino do que o minério da AGEO 91.

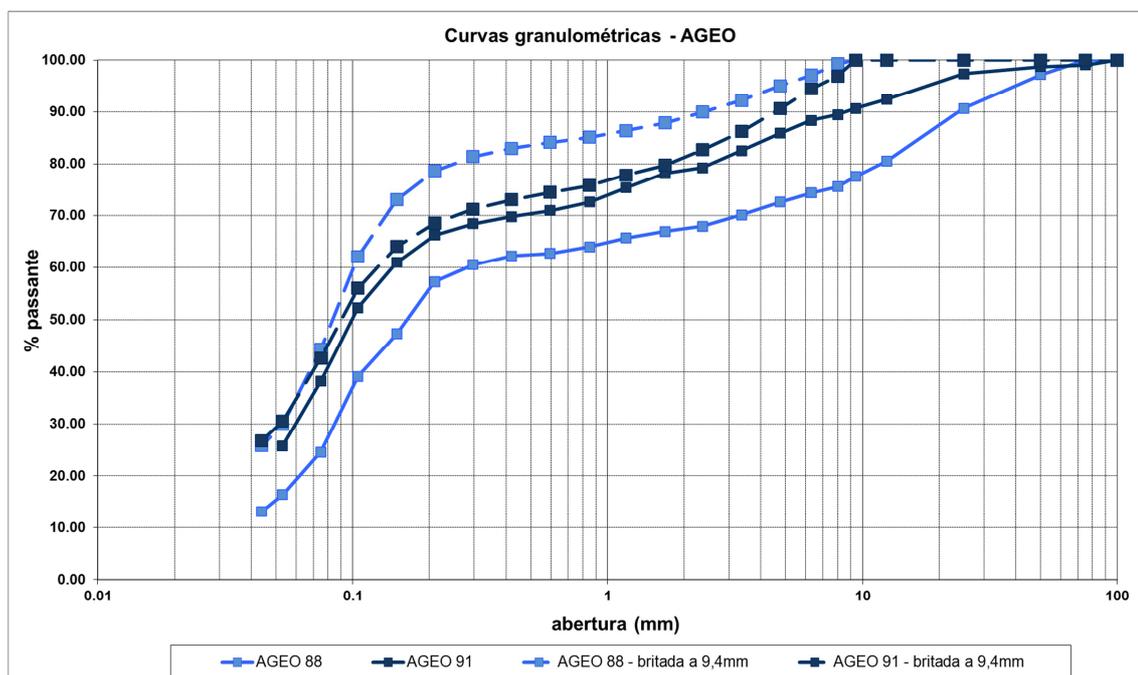


Figura 5.5 – Gráfico de distribuição granulométrica das AGEO 88 e AGEO 91 considerando a amostra tal e qual e britada a 9,4mm.

5.2 Análise química do ROM

Na tabela V.2 estão apresentados os resultados da análise química global do ROM de cada um dos minérios estudados.

Tabela V.2 - Composição química do ROM das amostras.

	Composição Química (%)						
	ROM						
	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO ₂	PPC	FeO
AGEO 72	38,5	41,1	0,24	0,045	0,02	3,49	0,97
AGEO 77	34,8	48,1	0,04	0,013	0,02	2,00	1,70
AGEO 88	47,8	27,3	0,19	0,020	0,10	2,99	1,20
AGEO 91	38,1	42,8	1,41	0,008	0,10	1,06	2,12
AGEO 107	40,5	39,9	0,12	0,030	0,10	0,81	0,61

A AGEO 88 é a amostra que corresponde a um minério consideravelmente mais rico do que os demais, com teor de Fe de 47,8%. É um tipo de minério importante na lavra e na composição do blend visto que o teor médio de Fe na alimentação dos concentradores é de 45,5% e a média da reserva é de 38%. Os demais tipos de minérios são considerados minérios pobres, com baixo teor de Fe. A AGEO 107 apresentou teor de Fe de 40,5%, a AGEO 72 apresentou teor de 38,5%, a AGEO 91 com teor de 38,1% e a AGEO 77 com apenas 34,8% de ferro.

A SiO_2 é o principal contaminante em todas as amostras, principalmente pelo fato dos minérios serem pobres em teor de ferro.

A AGEO 91 se destaca pelo elevado teor de Al_2O_3 (1,41%), que pode indicar a presença de argilominerais na sua composição, possivelmente caulinita e/ou gibbsita. As demais amostras apresentam teores de Al_2O_3 dentro da média dos teores dos minérios das minas de Alegria.

Os teores de P são variados e relativamente baixos para todas as amostras. A AGEO 72 é a amostra com o maior teor, 0,045%, enquanto que a AGEO 91 apresentou o menor teor de P, menor do que 0,010%.

Em relação ao MnO_2 as amostras de itabiritos anfibolíticos-martíticos, AGEO 72 e AGEO 77, foram as que apresentaram o menor teor, 0,02%. As demais amostras AGEO 88, AGEO 91 e AGEO 107 apresentaram teores de MnO_2 mais elevados (0,1%), teores superiores aqueles tradicionalmente encontrados nos minérios lavrados.

Os itabiritos anfibolíticos-martíticos da AGEO 72 e AGEO 77, juntamente com o itabirito martítico-especularítico-goethítico da AGEO 88, foram as amostras que apresentaram maiores teores de PPC, respectivamente 3,49%, 2,00% e 2,99%, sugerindo a presença da goethita na composição mineralógica destes minérios. Por sua vez, as amostras dos tipos martítico e especularítico-martítico apresentaram baixos teores de PPC, aproximadamente 1%.

5.3 Requerimento energético de moagem

Segundo Rodrigues *et al.* (2014) os resultados obtidos no ensaio de requerimento energético de moagem traduz a dureza, a compacidade e a resistência do minério ao processo de cominuição, refletindo o real comportamento do minério na etapa da moagem.

No gráfico da figura 5.6 estão apresentadas as curvas obtidas no ensaio de requerimento energético para cada uma das amostras estudadas. Conforme descrito no item 3.7.2, cada amostra é moída nos tempos de 5, 10, 15 e 20 minutos e os valores de energia (kWh/t), obtidos em cada moagem, são plotados no eixo das abscissas e os percentuais retidos na malha de 0,15mm de cada produto moído são plotados no eixo das ordenadas. Para o cálculo da energia ajusta-se uma curva exponencial decrescente (figura 5.7) para a obtenção da função exponencial.

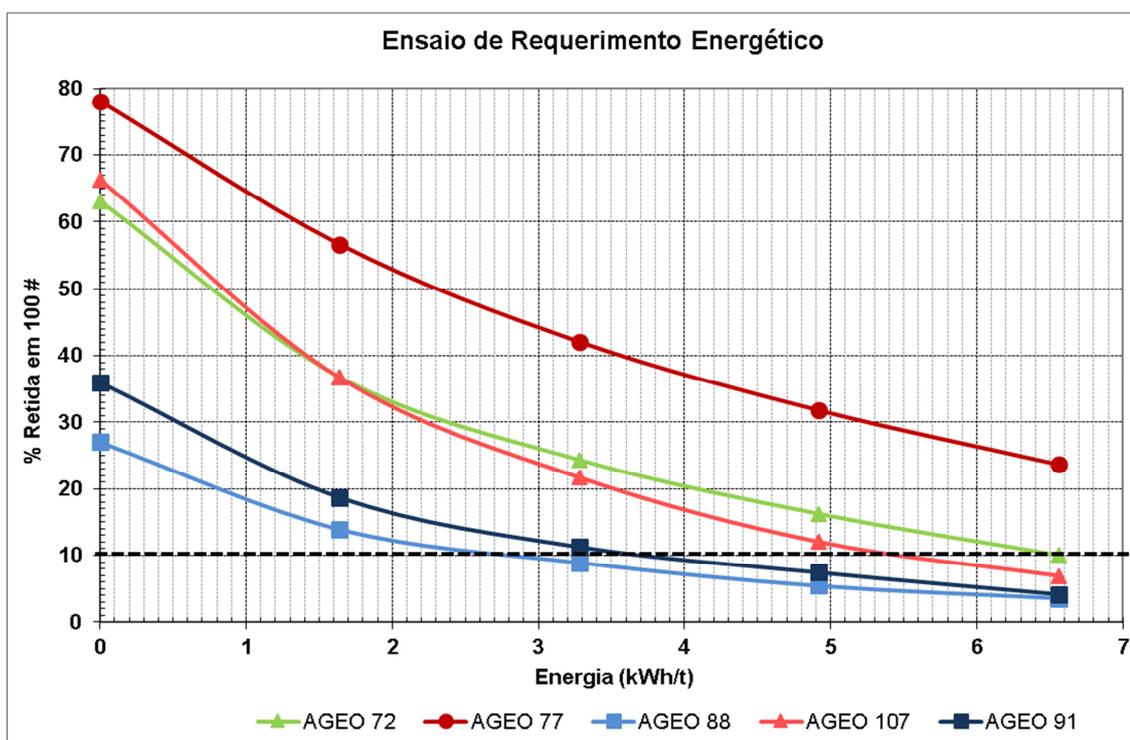


Figura 5.6 – Curvas obtidas no ensaio de requerimento energético da moagem para as amostras estudadas. Destaque para a linha tracejada marcando a especificação da moagem, 10% retido em 0,15mm.

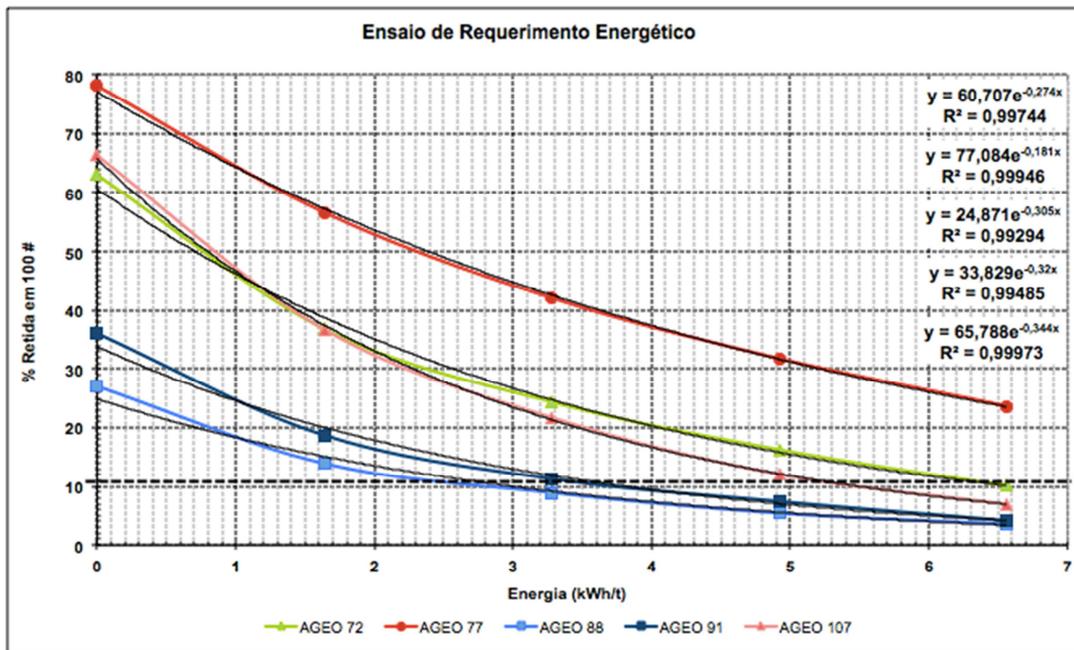


Figura 5.7 – Curva exponencial ajustada com a função equivalente para cada amostra.

Pelo gráfico da figura 5.6 e pelos valores de energia exibidos na tabela V.3 é possível afirmar que o minério da AGEO 88 é aquele que demanda menor consumo energético para a moagem considerando especificação de 10% retido em 0,15mm, com valor de 3,0 kWh/t.

A AGEO 91, mesmo correspondendo a um minério com granulometria bem mais fina do que da AGEO 88, apresentou valor de consumo energético ligeiramente maior, 3,8 kWh/t. Esta diferença nos valores de requerimento energético é atribuída aos diferentes teores de SiO₂ dessas amostras, sendo a AGEO 88 composta por 27,3% e a AGEO 91 por 48,2%. Minérios com maior proporção de quartzo em sua composição mineralógica, tendem a oferecer maior resistência ao processo de cominuição e, portanto, apresentarem valores de requerimento energético mais elevados. Considerando a escala de dureza de Mohs, que quantifica relativamente a dureza dos minerais, a resistência que determinado mineral oferece ao risco, o quartzo apresenta dureza 7 enquanto que hematita e a magnetita possuem dureza entre 5,5 e 6,5.

As amostras AGEO 72 e AGEO 107 apresentaram valores de requerimento energético distintos, apesar de exibirem distribuições granulométricas semelhantes, refletindo na mesma classificação quanto à compacidade, sendo ambos minérios semcompactos. Enquanto que para o minério da AGEO 72 foi obtido um valor de requerimento energético de 6,6 kWh/t, para a AGEO 107 o valor obtido foi de 5,5 kWh/t.

Segundo Rodrigues (2014), algumas variáveis intrínsecas do minério influenciam no valor de requerimento energético. A tipologia do minério, traduzida pela composição mineralógica, a composição química e a distribuição granulométrica são as variáveis mais relevantes para explicar os valores obtidos de consumo energético.

Os minérios da AGEO 72 e AGEO 107 correspondem a tipologias diferentes, enquanto que a AGEO 72 é uma amostra de um itabirito anfibolítico-martítico, o minério da AGEO 107 é um exemplar de um itabirito especularítico-martítico. Conforme discutido em Rodrigues *et al.* (2014) e Uiliana *et al.* (2012), minérios compostos essencialmente por hematita especular e hematita martítica tendem a apresentar valores mais baixos de requerimento energético quando comparados aos minérios anfibolíticos, principalmente aqueles que são compostos essencialmente por goethita maciça e/ou goethita botrioidal. Além disso, o minério da AGEO 107 apresentou teor ligeiramente menor de SiO₂ (39,9%) do que a AGEO 72 (41,1%).

Tabela V.3 – Valores de energia (kWh/t) das amostras estudadas obtidos no ensaio de requerimento energético de moagem.

	Requerimento Energético (kWh/t)
AGEO 72	6,6
AGEO 77	11,3
AGEO 88	3,0
AGEO 91	3,8
AGEO 107	5,5

O minério da AGEO 77, além de ser o mais blocoso, é aquele que apresenta o maior requerimento energético na moagem com valor de 11,3 kWh/t. Na curva exponencial obtida no ensaio e apresentada nas figuras 5.6 e 5.7, é possível notar que em 20 minutos de moagem (tempo final do teste) o minério permanece com 23,6% retido em 0,15mm, ou seja, a especificação da moagem não é atendida. Neste caso, o valor de requerimento energético é obtido pela extrapolação da curva. A AGEO 77 foi a única

amostra que apresentou esta condição e notavelmente representa o minério que oferece a maior resistência ao processo de cominuição.

O critério adotado pelas áreas de planejamento de mina e geologia da Samarco para a classificação do minério quanto à compacidade, baseado na estratificação granulométrica, atende perfeitamente às demandas da mina, principalmente aos planos de detonação, porém, não necessariamente reflete a dureza do minério frente a um processo de cominuição.

Intuitivamente acredita-se que quanto mais blocoso o minério, mais duro ele é. No entanto, há exemplos de minérios blocosos classificados da mesma forma mas que apresentam diferentes valores de requerimento energético. Em alguns casos, há minérios blocosos que são frágeis ao processo de moagem e outros que são mais finos e apresentam maior resistência à fragmentação.

Além da distribuição granulométrica, da composição química e da tipologia da rocha, outras variáveis, tais como, a textura e a trama da rocha, e o tamanho e forma dos cristais, resultado do processo de gênese desse minério, influenciam no comportamento dos minérios na etapa de moagem.

Os estudos conduzidos por Donda (2003) e Donda e Rosa (2014) demonstram e comprovam que o ensaio de requerimento energético de moagem é um método efetivo para previsão do consumo específico de energia dos moinhos industriais para a etapa da moagem primária e secundária ou (re)moagem. Os resultados são comprovados nos trabalhos e ao longo de 20 anos de operação dos concentradores da Samarco.

Considerando a energia instalada na etapa da moagem primária dos concentradores da Samarco, o minério pode requerer maior ou menor energia para a moagem a 10% retido em 0,15mm. Quando a previsão de consumo energético da moagem do minério é menor do que a energia instalada industrialmente, o processo de moagem deverá ocorrer normalmente e a especificação do produto moído atendida. No entanto, quando o requerimento energético de moagem do minério é maior do que a energia instalada, há um desbalanceamento que pode influenciar na taxa de alimentação e na especificação do produto moído. Neste caso, deverá ocorrer a redução da taxa de alimentação para que a especificação seja atendida, caso contrário, a especificação do produto moído certamente será perdida.

Respeitando a energia instalada de 3,9 kWh/t no concentrador I da Samarco, que é aquele que apresenta a menor energia disponível, e considerando os resultados

obtidos no ensaio de requerimento energético de moagem das amostras estudadas, é possível constatar que:

- Os minérios da AGEO 88 e AGEO 91 possuem requerimento energético de moagem menor do que a energia instalada e por isso, não apresentarão dificuldades ao processo industrial de moagem.
- As amostras AGEO 72 e 107 exibem valores de requerimento energético de moagem acima do limite de energia disponível. Desta maneira, deverá ocorrer a redução da taxa de alimentação na etapa de moagem para não haver perda de especificação. Por exemplo, mantendo a taxa de alimentação da moagem e de acordo com as curvas do ensaio do requerimento energético da figura 5.6, considerando o valor de referência da energia de 3,9 kWh/t, a AGEO 72 permanece com 20,5% do minério retido em 0,15mm e a AGEO 107 com 17% retido em 0,15mm. Desta forma, em ambas as amostras, a especificação da moagem de 10% retido em 0,15mm não seria obtida.
- O minério da AGEO 77, por ser um minério muito mais duro do que os demais, apresenta um quadro ainda mais complicado, onde nem em 20 minutos de moagem atingiu-se a especificação de 10% retido em 0,15mm. Considerando o valor de referência de 3,9 kWh/t, o minério ainda estaria com 38% de material retido em 0,15mm.

Os resultados do ensaio de requerimento energético de moagem permitem ao planejamento de mina fornecer informações à engenharia de processo de forma a antever a necessidade de investimentos nas etapas de moagem para as usinas existentes ou auxiliar no dimensionamento de novas instalações. No curto prazo, os dados influenciam no planejamento de lavra pois torna-se necessário adequar o blending de minério respeitando a energia instalada nos concentradores.

Os minérios das amostras AGEO 72, AGEO 77 e AGEO 107, além de apresentarem características que traduzem na dureza do minério ao processo de cominuição, excedem no valor de referência do requerimento energético de moagem, que refletem no não atendimento à especificação da moagem. Nestas condições pode haver um prejuízo na liberação mineral e conseqüentemente na obtenção da qualidade de um concentrado de minério de ferro.

5.4 Estudo do grau de liberação no processo de moagem

Conforme exposto no capítulo da revisão bibliográfica, no processo de beneficiamento de minérios de ferro de baixo teor, a liberação mineral é uma condição fundamental para a etapa de concentração por flotação catiônica reversa. A obtenção da liberação mineral ocorre pela redução do tamanho de partículas por meio do processo de cominuição, principalmente moagem.

No processo produtivo da Samarco, a moagem primária precede os processos da deslamagem e da flotação convencional, trabalha com a especificação na malha de 0,15mm com o objetivo de ajustar a granulometria do minério para o processo de flotação e de obter pelo menos 90% de grau de liberação do quartzo na fração + 0,15mm.

Segundo os resultados do ensaio de requerimento energético da moagem (tabela V.3), os minérios apresentam diferentes consumos energéticos para uma mesma especificação da moagem, variando de 3,0 kWh/t a 11,3 kWh/t. Estes valores traduzem a resistência dos minérios ao processo de fragmentação e podem refletir em uma menor ou maior dificuldade para obtenção da liberação mineral.

Com objetivo de contribuir com o entendimento do processo de liberação mineral a partir da fragmentação do minério na etapa de moagem, foi realizado um trabalho de caracterização mineralógica com foco na liberação do quartzo com as amostras quando submetidas ao ensaio de requerimento energético de moagem. Para tal, cada alíquota moída nos ensaios foi encaminhada para determinação do grau de liberação do quartzo nas frações +0,15mm, -0,15mm e global, via MLR.

A alíquota “alimentação da moagem” representa o estado inicial da amostra antes do processo de moagem, ou seja, a amostra foi apenas britada abaixo de 9,4mm. O restante das alíquotas corresponde aos tempos de 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos e 20 minutos de moagem.

Pelos resultados apresentados na tabela V.4, é possível notar que a AGEO 77 é a amostra com o menor valor de liberação do quartzo na alimentação da moagem. O grau de liberação do quartzo na fração global é de apenas 43,2%. Esta amostra, pelas descrições e discussões anteriores, apresentou características de grande resistência ao processo de cominuição, refletindo então na obtenção da liberação mineral. Na

fração +0,15mm o grau de liberação é igual a 31,3% e no passante em 0,15mm o grau de liberação é de 85,7%.

O minério da AGEO 107 também apresenta um baixo valor de grau de liberação na fração global da alimentação da moagem (60%) e no retido em 0,15mm (43,8%), apesar de mais elevado do que da AGEO 77. É interessante notar que na fração menor que 0,15mm, que corresponde a 33,7% da amostra, o grau de liberação é de 92%, indicando que esta malha de 0,15mm é favorável para a liberação do quartzo deste minério. Desta forma, acredita-se que na especificação da moagem de 10% retido em 0,15mm o minério esteja com grau de liberação adequado para a flotação.

O mesmo acontece com o minério da AGEO 72, que apesar de apresentar um baixo grau de liberação na alíquota global da alimentação da moagem (63,9%) e na fração +0,15mm (46,3%), exibe um grau de liberação de 94,1% na fração abaixo de 0,15mm, neste caso, corresponde a 36,9% da amostra.

Os minérios da AGEO 88 e AGEO 91 se mostram como referências dentre as amostras estudadas pelos elevados valores de grau de liberação, maiores do que 95% nas frações retida e passante em 0,15mm, já na alimentação da moagem. Estes são tipos de minérios que alimentam a moagem já com a liberação do quartzo em valores ótimos para a etapa de concentração. Considerando somente o grau de liberação do quartzo, estes minérios podem ser considerados como excelentes para o processo de flotação.

Tabela V.4 – resultados do grau de liberação do quartzo da alimentação da moagem nas frações +0,15mm, -0,15mm e na alíquota global.

	Grau de Liberação (%)		
	Alimentação da Moagem		
	+0,15mm	-0,15mm	Global
AGEO 72	46,3	94,1	63,9
AGEO 77	31,3	85,7	43,2
AGEO 88	95,7	99,4	98,4
AGEO 91	96,0	99,5	98,2
AGEO 107	43,8	92,0	60,0

Para demonstrar os resultados do grau de liberação do quartzo e da distribuição das partículas mistas integrados ao resultado da moagem dos minérios, são apresentados os gráficos das figuras 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12. Nestes gráficos é possível observar a curva exponencial obtida nos ensaios de requerimento energético de moagem com a distribuição dos tipos de partículas mistas e livres de cada tempo de moagem e o respectivo valor de grau de liberação do quartzo, da alíquota global das amostras.

No gráfico da figura 5.8 estão apresentados os dados da amostra AGEO 88. Conforme mencionado anteriormente, na alimentação da moagem o minério já apresenta um elevadíssimo valor de grau de liberação, 98,4%. Neste estado inicial a AGEO 88 apresenta 62% das partículas de quartzo liberadas e 29% de partículas livres de óxidos/hidróxido de ferro. Apenas 8% das partículas da alíquota são partículas mistas, sendo 3% das partículas tipo 3 e 5% partículas mistas complexas (tipo 4).

Após 5 minutos de moagem, o grau de liberação do quartzo se mantém com 98,4%, o percentual de partículas liberadas de quartzo cai para 54% e as liberadas de óxidos/hidróxido aumentam para 33%. As partículas mistas somam 10%, sendo 7% de partículas mistas complexas.

À medida em que a moagem avança, em 10, 15 e 20 minutos, o grau de liberação do quartzo aumenta e chega a quase 100%. O percentual de partículas livres de ganga aumenta para 58% em 10 minutos de moagem, 64% em 15 minutos e depois cai para

59% aos 20 minutos de moagem. As partículas livres de óxidos/hidróxido de ferro aumentam para 38% em 10 minutos, caem para 35% em 15 minutos e voltam a aumentar em 20 minutos de moagem para 40%. O percentual de partículas mistas cai de 4% para 1% do tempo de 10 minutos para 20 minutos de moagem.

As pequenas flutuações dos valores do grau de liberação e da distribuição de partículas entre os tempos de moagem de 10, 15 e 20 minutos é pouco relevante, visto que, em todos os casos, o grau de liberação se aproxima de 100% e as partículas livres de quartzo e de óxidos/hidróxido de ferro somam mais de 96% do total de partículas.

Este é um tipo de minério que apresenta uma textura e uma microestrutura favoráveis para obtenção da liberação mineral. Em pequenos graus de cominuição, o minério já encontra-se com os grãos dos minerais de ganga liberados. A expectativa é que este minério apresentará excelente cinética de flotação.

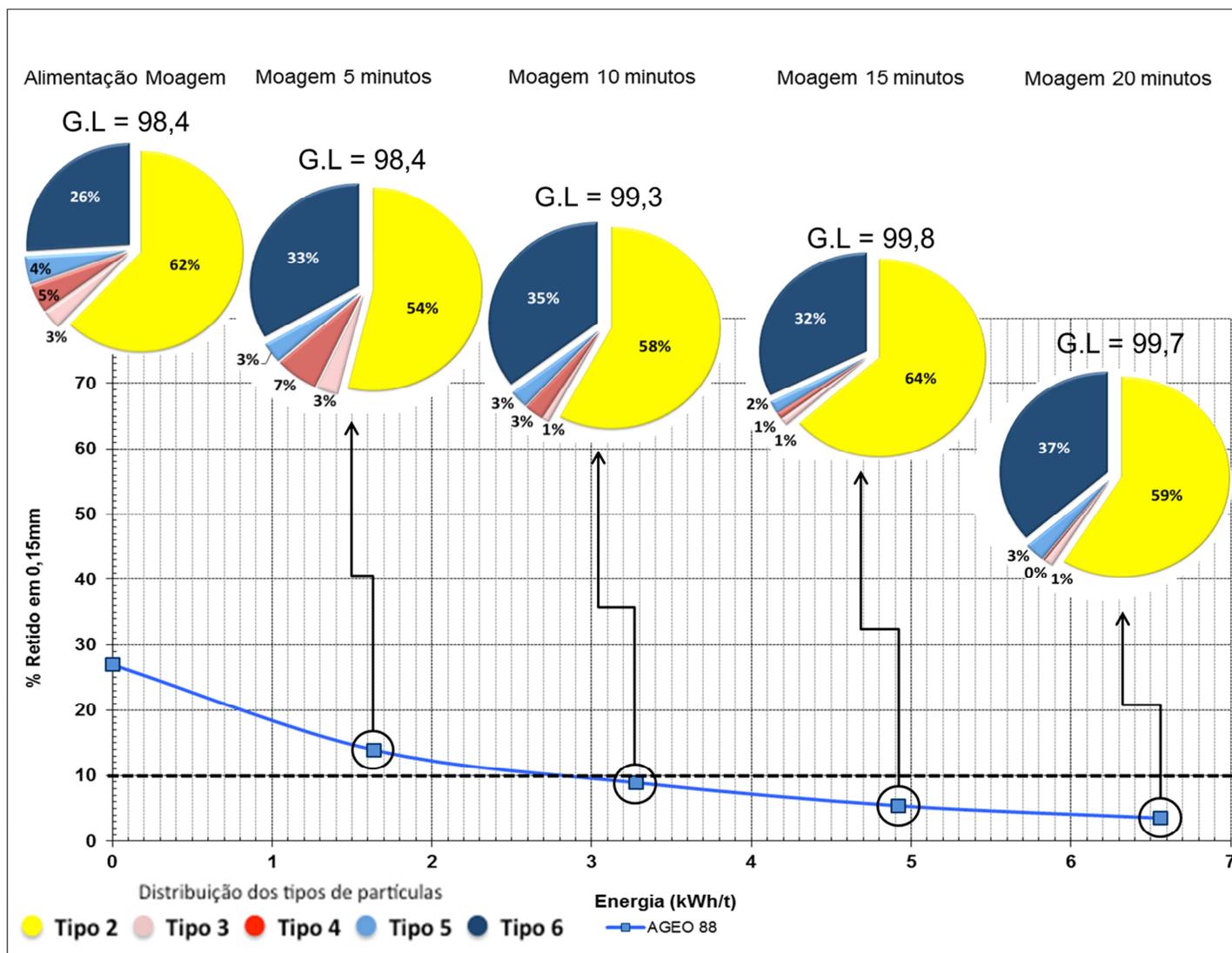


Figura 5.8 – AGEO 88: Gráfico do ensaio de requerimento energético de moagem integrado com a distribuição dos tipos de partículas mistas e livres e os respectivos valores de grau de liberação do quartzo.

Assim como na AGEO 88, o minério da AGEO 91 apresenta elevado valor de grau de liberação já na alimentação da moagem, com 98,2% (figura 5.9). Nesta condição, 60% das partículas correspondem àquelas liberadas de quartzo e 30% são as liberadas de óxidos/hidróxido de ferro, sendo que 4% representam as partículas tipo 5 e 26% as partículas tipo 6. As partículas mistas somam 10% sendo que 8% são de partículas mistas complexas tipo 4 e 2% de partículas tipo 3.

Aos 5 minutos de moagem o grau de liberação alcança a praticamente 100%, e assim permanece nos tempos de 10, 15 e 20 minutos. A distribuição dos tipos de partículas mistas e livres mostra que as partículas liberadas de quartzo correspondem a 57% do total de partículas e as liberadas de óxidos ou hidróxido de ferro somam 38%, um aumento em relação à alimentação da moagem. As partículas mistas apresentam queda na proporção, somando apenas 5% do total de partículas, sendo que 2% são de partículas mistas tipo 3 e 3% de partículas mistas tipo 4.

Após 10 minutos de moagem o cenário da distribuição dos tipos de partículas mistas altera razoavelmente, com as partículas liberadas de quartzo correspondendo a 49% e as partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro somando 48%, valor consideravelmente superior às alíquotas da alimentação da flotação e moagem em 5 minutos. As partículas mistas são inexpressivas e somam apenas 3% do total.

Em 15 minutos de moagem as condições de distribuição dos tipos de partículas livres e mistas é praticamente idêntico à moagem em 10 minutos. Com as partículas liberadas de quartzo e dos óxidos/hidróxido de ferro somando 94% e as partículas mistas somando apenas 4%.

Em 20 minutos de moagem as condições se mantem com exceção do leve aumento da proporção de partículas mistas tipo 4 que chegam a 5%. Provavelmente, com a sobre moagem deste minério partículas mistas complexas tipo 4 foram sendo fragmentadas e gerando novas partículas mistas.

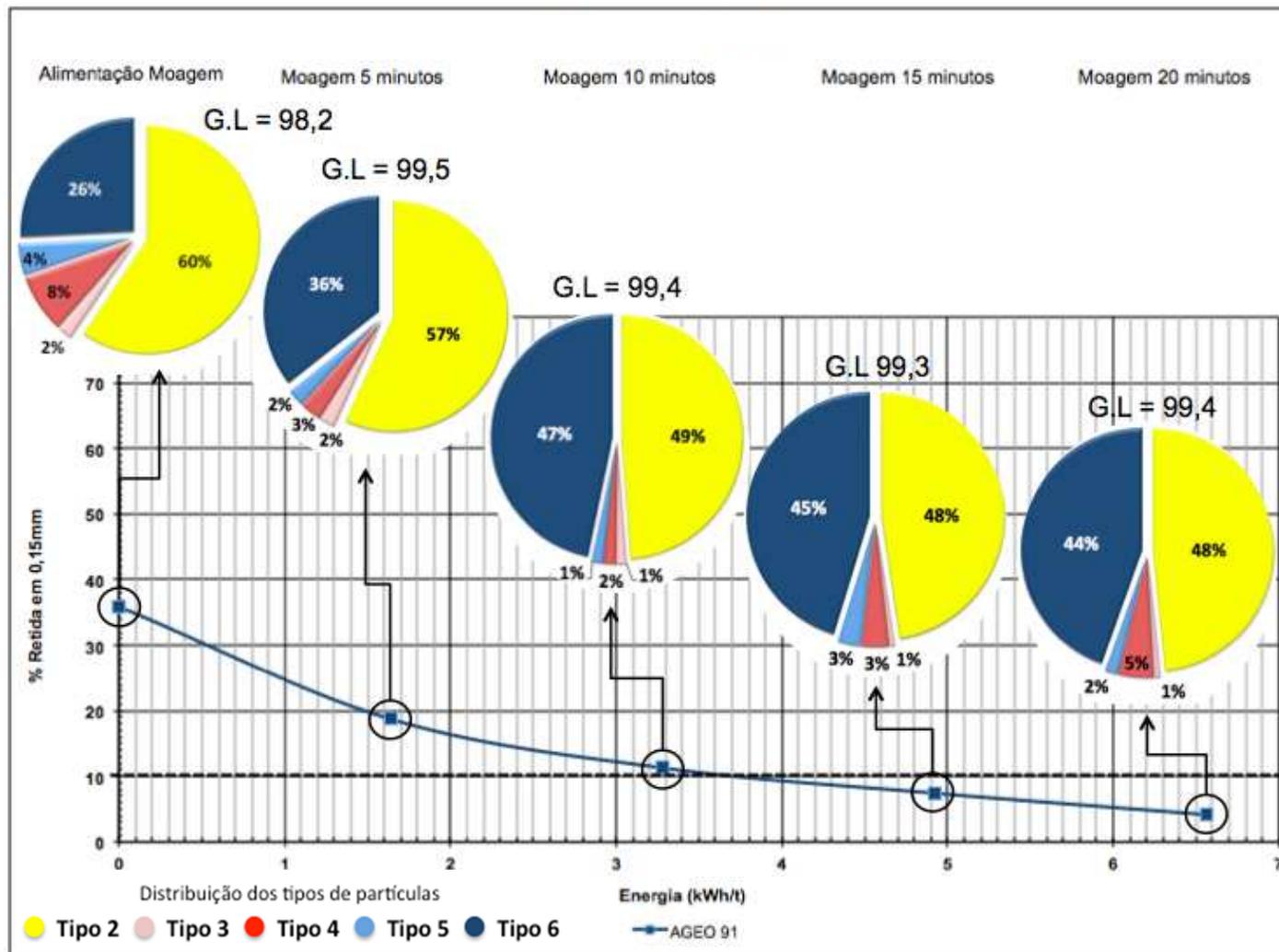


Figura 5.9 – AGEO 91: Gráfico do ensaio de requerimento energético de moagem integrado com a distribuição dos tipos de partículas mistas e livres e os respectivos valores de grau de liberação do quartzo.

Na figura 5.10 encontram-se os dados da AGEO 72. Diferentemente da amostra AGEO 88, este minério apresenta na alimentação da moagem um elevado percentual de partículas mistas (50%), principalmente de partículas mistas complexas tipo 4, com 41%. O percentual de partículas livres de quartzo é de 37% enquanto que as partículas livres de óxidos/hidróxido de ferro somam apenas 13%. Este espectro de liberação reflete no baixo grau de liberação de 63,9% da amostra na alimentação da moagem.

Aos 5 minutos de moagem, o percentual de partículas mistas complexas reduz para 27% e de partículas mistas tipo 3 se mantem em 9%. As partículas livres de quartzo aumenta para 48% e as livres de óxidos/hidróxido somam 16%. Desta forma, o grau de liberação do quartzo aumenta para 75,7%.

Após 10 minutos de moagem, a distribuição dos tipos de partículas não se altera muito em relação à amostra moída em 5 minutos. As partículas mistas tipo 4 decresce para 23% e do tipo 3 aumenta para 13%. As partículas livres de quartzo chegam a 49% e as partículas livres de óxidos/hidróxido soma 15%. Apesar da pequena alteração na distribuição das partículas mistas, o grau de liberação chega a 82,7% após 10 minutos de moagem.

Em 15 minutos de moagem o percentual de partículas livres de ganga passa dos 50% e as partículas livres de óxidos/hidróxido somam 17%. As partículas mistas caem para 31% sendo que as partículas mistas tipo 3 permanecem em 13% e as complexas tipo 4 diminuem para 18%. O grau de liberação do quartzo atinge os 85%.

Aos 20 minutos de moagem, o retido em 0,15mm chega aos 10%, especificação da moagem. O grau de liberação é de 90,2%, um valor favorável ao processo de flotação. O percentual de partículas livres de quartzo é de 55% e as partículas livres de óxidos/hidróxido somam 19%.

No entanto, mesmo com espectro de liberação favorável, o produto moído deste minério ainda apresenta um percentual de partículas mistas que somam 26%, sendo 13% de partículas mistas tipo 4. Resta saber se a presença deste percentual de partículas mistas afetará o processo de flotação.

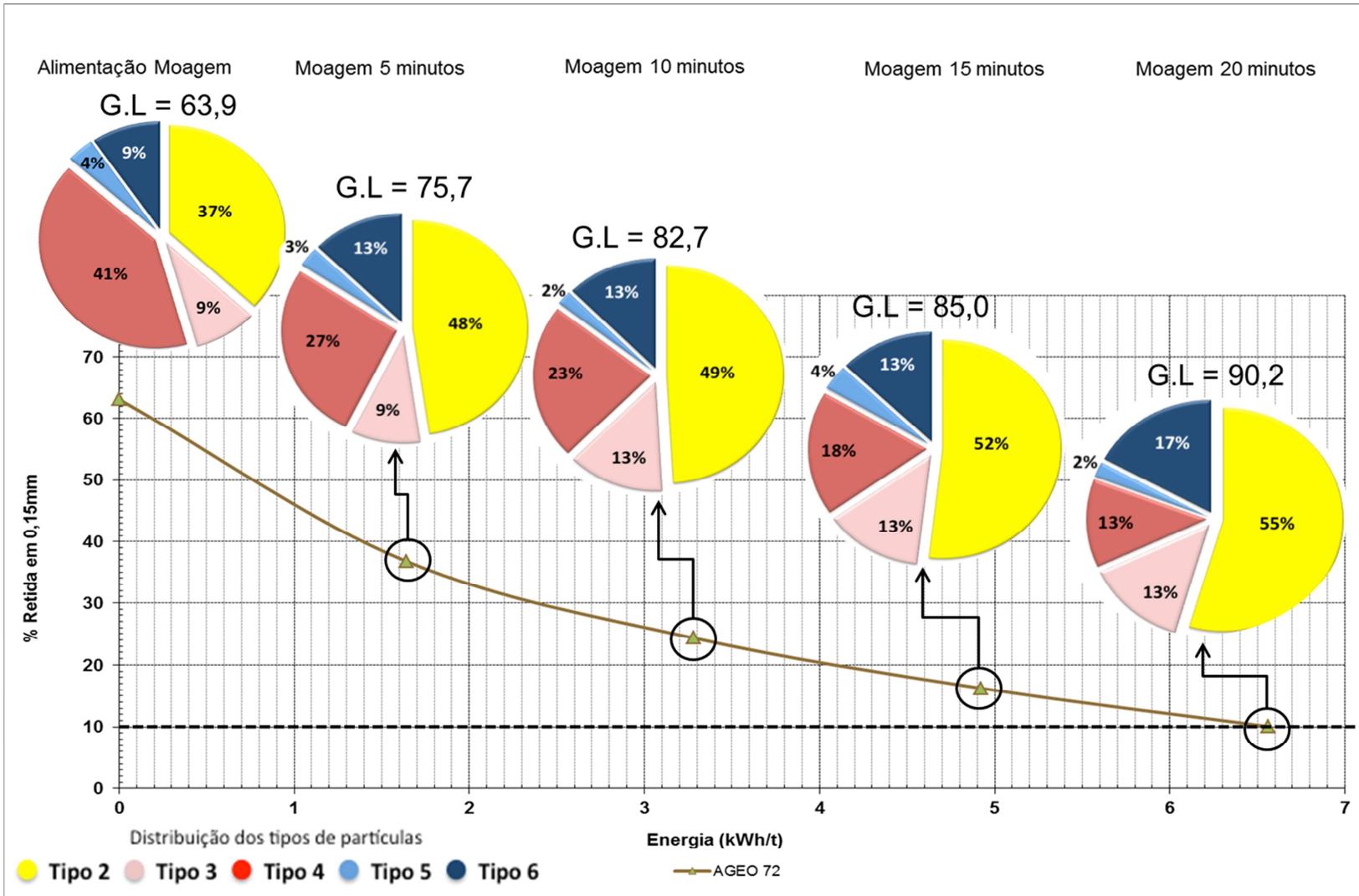


Figura 5.10 – AGEO 72: Gráfico do ensaio de requerimento energético de moagem integrado com a distribuição dos tipos de partículas mistas e livres e os respectivos valores de grau de liberação do quartzo.

Outro minério semicompacto estudado, a AGEO 107 (figura 5.11), exibe resultados distintos daqueles apresentados pela AGEO 72. Já na alimentação da moagem, este minério possui um menor valor de grau de liberação do quartzo, 60%, conforme mencionado anteriormente, e uma distribuição diferenciada dos tipos de partículas. Do total de partículas, 51% são partículas mistas complexas tipo 4 e 9% partículas mistas tipo 3, somando 60% de partículas mistas, valor consideravelmente superior da AGEO 72 nesta mesma condição de cominuição. O percentual de partículas livres de quartzo é de 30% e as livres de óxidos/hidróxido de ferro somam 13%.

Em 5 minutos de moagem o percentual de partículas mistas complexas tipo 4 diminuem para 31%, representando uma redução considerável. As partículas mistas tipo 3 aumenta para 14%, podendo ser produto da fragmentação das partículas mistas tipo 4. As partículas liberadas de óxidos/hidróxido aumenta para 25% e as partículas livres de ganga se mantem na mesma proporção, na ordem de 30%. O grau de liberação do quartzo atinge 69,2%.

Após 10 minutos de moagem o percentual de partículas livres de quartzo chega a 38% do total de partículas e as liberadas de óxidos/hidróxido de ferro somam 26%. As partículas mistas complexas decrescem para 23% e as mistas tipo 3 para 13%. O grau de liberação do quartzo é de 78%.

Em 15 minutos de moagem a participação das partículas mistas complexas reduzem para 18% e as partículas mistas tipo 3 praticamente não se altera, correspondendo a 12%. As partículas livres de quartzo sobem para 40% e as liberadas de óxidos/hidróxido somam 30%. Com isso, a liberação do quartzo chega a 82,1%.

Em 20 minutos de moagem a especificação de 10% retido em 0,15mm já é atingida, chegando a 6,9%. As partículas mistas somam 21%, sendo que as partículas mistas complexas tipo 4 caíram para 11% e as partículas tipo 3 para 10%. As partículas liberadas de quartzo atingem 42% e as liberadas de óxidos/hidróxido de ferro somam 37%. Neste contexto, o grau de liberação do quartzo atinge 88,7%.

Ao final de 20 minutos de moagem o grau de liberação do quartzo da AGEO 107 (88,7%) é menor do que da AGEO 72 (90,2%). Analisando única e exclusivamente o grau de liberação, intuitivamente, imagina-se que o minério da AGEO 72 será mais favorável ao processo de flotação do que a AGEO 107. No entanto, analisando friamente os dados, percebe-se que o minério da AGEO 72, apesar de apresentar maior valor de grau de liberação e maior percentual de partículas livres de quartzo,

apresenta um percentual maior de partículas mistas (23%), principalmente partículas mistas complexas tipo 4 (13%), do que a AGEO 107, que apresenta 21% de partículas mistas sendo 11% de partículas mistas complexas. Além disso, o percentual de partículas livres de óxidos/hidróxido da AGEO 107 é consideravelmente superior do que da AGEO 72, sendo 37% e 19%, respectivamente.

A diferença parece pouco expressiva, porém, imaginando o grau de redução de sílica que se pretende com o estágio de concentração, essas pequenas diferenças podem ser o suficiente para obter um concentrado com a qualidade desejada.

O minério da AGEO 77 exibe resultados totalmente distintos dos resultados apresentados até então, tanto para o valor de grau de liberação quanto para distribuição de partículas mistas e livres (figura 5.12).

Na alimentação da moagem o grau de liberação do quartzo é de apenas 43,2%. A distribuição das partículas justifica tal valor, pois 62% das partículas são mistas complexas tipo 4 e outros 9% são mistas tipo 3. Apenas 25% das partículas são de quartzo liberadas e as partículas livres de óxidos/hidróxido são de apenas 4%.

Com 5 minutos de moagem o grau de liberação aumenta para 51,8%. As partículas mistas complexas tipo 4 ainda correspondem a 50% da amostra e as partículas mistas tipo 3 aumentam para 11%. As partículas liberadas de quartzo chegam a 33% e as livres de óxidos/hidróxido de ferro somam apenas 6%.

Após 10 minutos de moagem o grau de liberação do quartzo ainda é muito baixo, apenas 62,7%. O percentual de partículas mistas chega a 54% sendo que 40% são de partículas mistas complexas e outros 14% de partículas mistas tipo 3. As partículas livres de quartzo correspondem a 39% e as livres de óxidos/hidróxido de ferro somam 7%.

Em 15 minutos de moagem o grau de liberação aumenta para 69,1%. As partículas mistas complexas tipo 4 decrescem para 32% e as mistas tipo 3 apresenta pequena diferença, correspondendo a 15%. O percentual de partículas livres de quartzo chega a 45% e as partículas livres de óxidos/hidróxido de ferro somam apenas 8%.

Em 20 minutos de moagem o percentual retido em 0,15mm ainda não chega a 10%, atingindo somente 23,4%. Este fato reflete no baixo grau de liberação deste minério, com o valor 71,5% ao final da moagem. O percentual de partículas livres de quartzo é de apenas 44%, menor até do que a alimentação da moagem da AGEO 88, que neste

estágio estava apenas britada abaixo de 9,4mm. As partículas liberadas de óxidos/hidróxido somam somente 7% do total. O percentual de partículas mistas somam 49%, sendo 27% de partículas mistas complexas tipo 4 e 22% de partículas mistas tipo 3.

A condição de liberação deste minério é extremamente desfavorável ao processo de flotação e certamente irá prejudicar na obtenção de um concentrado de baixo teor de SiO_2 .

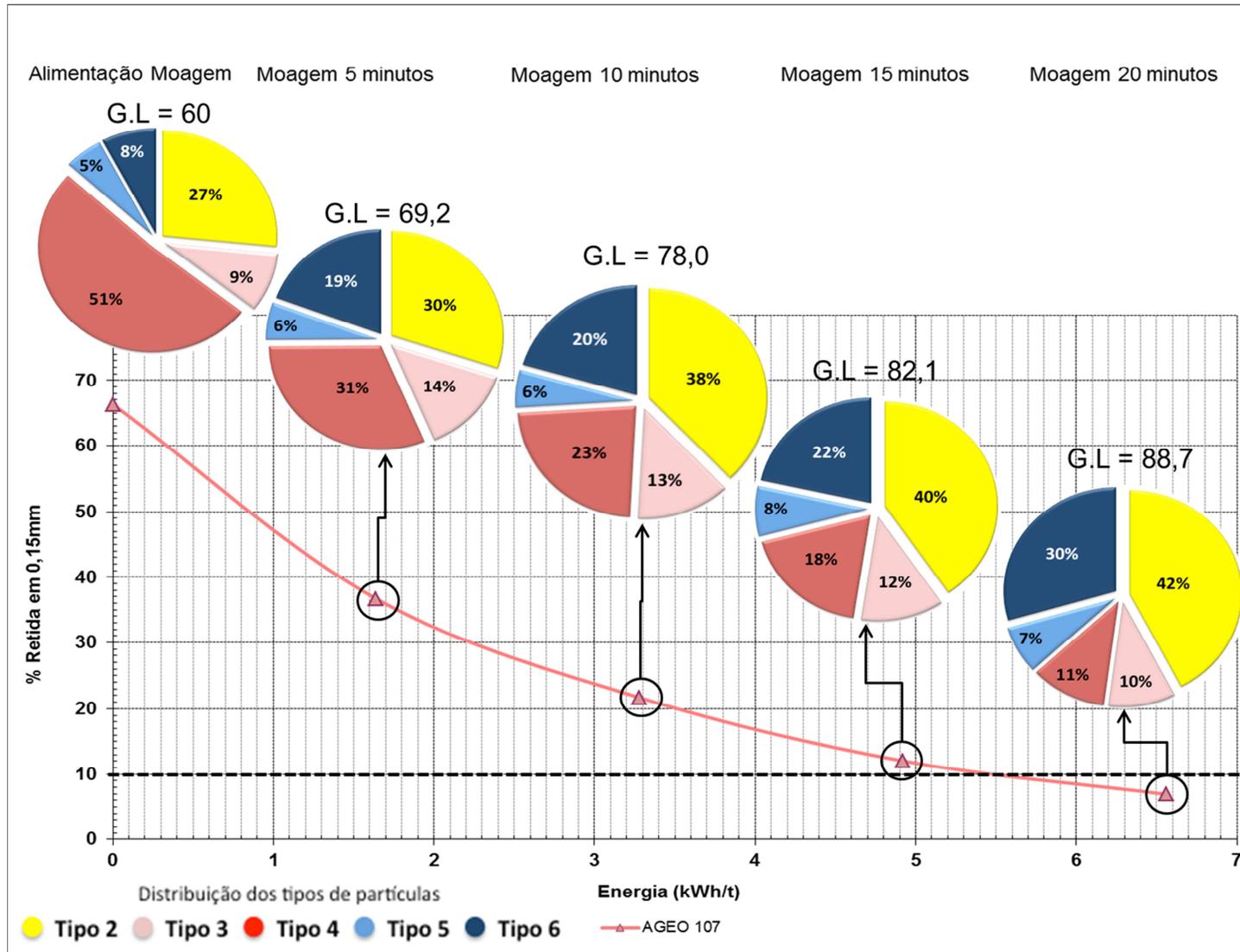


Figura 5.11 – AGEO 107: Gráfico do ensaio de requerimento energético de moagem integrado com a distribuição dos tipos de partículas mistas e livres e os respectivos valores de grau de liberação do quartzo.

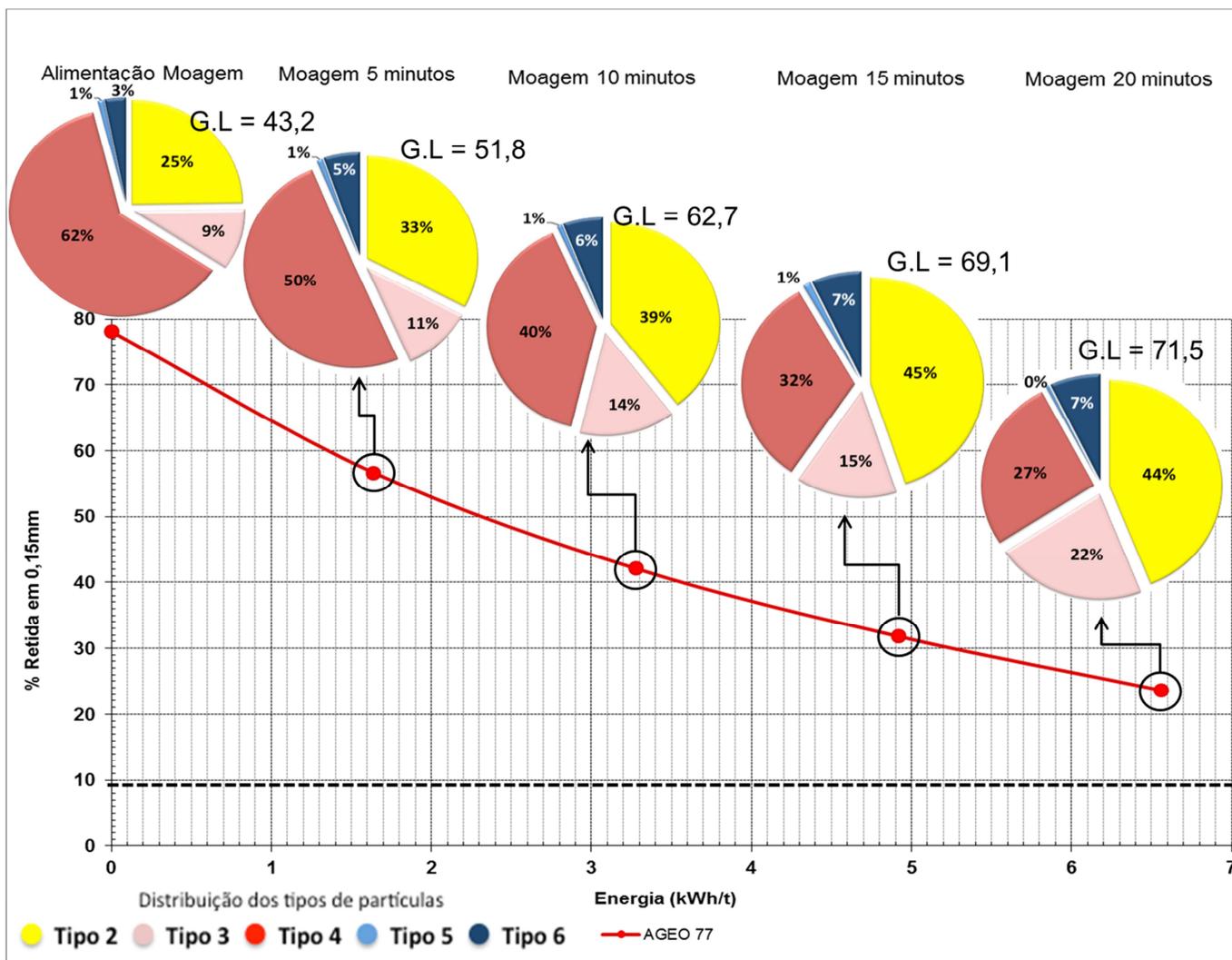


Figura 5.12 – AGEO 77: Gráfico do ensaio de requerimento energético de moagem integrado com a distribuição dos tipos de partículas mistas e livres e os respectivos valores de grau de liberação do quartzo.

5.5 Deslamagem

Seguindo o fluxograma de caracterização das amostras, após o processo de moagem, o minério foi submetido à etapa de deslamagem para retirada da fração ultrafina, abaixo de 0,010mm.

Analisando os resultados obtidos nos testes de deslamagem das amostras estudadas, apresentadas na tabela V.5, e das análises química da lama (overflow da deslamagem), apresentados na tabela V.6, pode-se verificar que:

Tabela V.5 – Resultados das recuperações mássica e metálica e o percentual de lama das amostras na etapa de deslamagem.

	Recuperação em Peso (%)	Recuperação Metálica (%)	% lama
AGEO 72	83,2	83,0	17
AGEO 77	80,1	78,1	20
AGEO 88	88,0	85,2	12
AGEO 91	93,2	99,6	7
AGEO 107	92,7	91,1	7

Tabela V.6 – Composição química da amostra global da lama (overflow da deslamagem).

Composição Química (%)							
LAMA (OVERFLOW DA DESLAMAGEM)							
	Fe	SiO₂	Al₂O₃	P	MnO₂	PPC	FeO
AGEO 72	42,8	32,6	0,58	0,08	0,028	5,38	0,15
AGEO 77	38,5	41,4	0,09	0,03	0,014	3,38	0,17
AGEO 88	59,0	8,1	0,46	0,05	0,047	6,85	0,23
AGEO 91	35,6	30,1	12,30	0,03	0,01	6,32	0,40
AGEO 107	41,3	37,8	0,51	0,07	0,027	2,47	0,23

- Os minérios da AGEO 72 e 77, classificados previamente como minérios anfíbolíticos, foram os que apresentaram as maiores porcentagens de lama, com valores de 17% e 20%, respectivamente. Esses são valores bem elevados quando comparados à média da porcentagem de lama gerada industrialmente na Samarco, cerca de 8%. O minério da AGEO 77, que apresentou o maior percentual de lama, foi o que obteve os menores valores de recuperação mássica e metálica, 80,1% e 78,1%. A AGEO 72, com a segunda maior porcentagem de lama, foi a amostra que exibiu o segundo menor valor de recuperação mássica (83,2%) e metálica (83%).
- A qualidade da lama da AGEO 72 se destaca pelo elevado teor de PPC (5,38%). As demais variáveis apresentam teores moderados de Fe (42,8%), Al₂O₃ (0,58%) e P (0,08%), maiores do que do ROM. Os teores da lama da AGEO 77 são baixos a moderados, bem próximos à alíquota de ROM, sendo os teores de Fe (38,5%) e PPC (3,38%) levemente superiores.
- O minério da AGEO 88 que exibe teores baixo de Al₂O₃ e moderado de PPC (tabela V.2) apresentou porcentagem moderada de lama (12%) e valores medianos de recuperação mássica (88%) e metálica (85,2%), quando comparada as demais amostras. A lama dessa amostra se destaca pelo elevado teor de Fe (59%), evidenciando perda de conteúdo metálico na etapa

de deslamagem. O teor de PPC na lama é também o mais alto entre todas as amostras, 6,85%, sugerindo que a lama seja composta essencialmente por goethita terrosa.

- O minério da AGEO 107, previamente classificado com sendo um minério especularítico-martítico, com baixo teor de PPC e de Al_2O_3 , que se reflete em baixa proporção de goethita e de argilominerais em sua composição, apresentou altos valores de recuperação em peso e metálica, respectivamente, 92,7% e 91,1%. O percentual de lama gerada foi baixo, 7%. A qualidade química da lama mostra teores moderados de Fe (41,3%) e Al_2O_3 (0,51%) e o menor teor de PPC (2,47%) em relação as demais amostras.
- A AGEO 91 apresentou o valor mais elevado de recuperação em peso, 93,2%, o que se reflete em um baixo percentual de lama gerada, 7%. A recuperação metálica de quase 100% indica uma lama composta essencialmente por argilominerais, evidenciada pelo teor de Al_2O_3 da lama de 12,3%, levando a um enriquecimento relativo do teor de ferro após o processo de deslamagem. Pelos resultados da análise química da alimentação da flotação apresentados na tabela V.7 é possível notar que o teor do ROM de 38,1% aumentou para 40,7% no underflow.

5.5.1 Qualidade química da alimentação da flotação

Os dados apresentados na tabela V.7 mostram os resultados da análise química do underflow da deslamagem, referente à alíquota global da alimentação da flotação. Na tabela V.8 encontram-se os resultados da análise química da alimentação da flotação por faixa granulométrica, considerando as frações +0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm. No anexo 1, encontra-se a comparação do resultado da análise química da alíquota global com o resultado ponderado da granuloquímica considerando a quantidade de minério retido em cada uma das faixas analisadas. Este resultado foi denominado como “resultado teórico”.

Tabela V.7 – Composição química da amostra global do underflow da deslamagem, ou seja, alimentação da flotação.

Composição Química (%)							
ALIMENTAÇÃO DA FLOTAÇÃO							
	Fe	SiO₂	Al₂O₃	P	MnO₂	PPC	FeO
AGEO 72	38,4	41,4	0,18	0,049	0,02	3,29	0,52
AGEO 77	33,9	49,4	0,05	0,014	0,01	1,98	1,49
AGEO 88	46,3	30,5	0,15	0,018	0,10	2,53	1,03
AGEO 91	40,7	39,0	0,64	0,009	0,10	0,83	2,29
AGEO 107	39,8	40,4	0,11	0,028	0,10	0,93	0,47

O minério da AGEO 72 apresentou praticamente o mesmo teor de ferro na alimentação da flotação em relação ao ROM, com teor de ferro de 38,4%, a queda é inexpressiva considerando que o teor no ROM era de 38,5%. Houve queda um pouco mais expressiva nos teores de PPC e de Al₂O₃ após o processo de deslamagem, com teores do underflow de 3,29% e 0,18%, respectivamente. A queda desses teores é consequência da composição do overflow, que reflete a qualidade química da lama, apresentando teor elevado de PPC (5,38%) e moderado de Al₂O₃ (0,58%).

Conforme dados da tabela V.8, o teor de ferro da AGEO 72 encontra-se predominantemente na fração mais grosseira da amostra, +0,15mm, onde o teor é de 46,7%. A fração mais fina, -0,044mm, apresenta teor de 39,2% enquanto que as frações intermediárias, -0,15mm +0,075mm e -0,075mm +0,044mm, com teores de apenas 37,3% e 33,0%, respectivamente. Com relação as demais variáveis, destaca-se o teor de PPC mais elevado na fração mais grosseira da amostra com 5,51%, acompanhando o teor de ferro.

Tabela V.8 – Composição química por faixa granulométrica do underflow da deslamagem.

Composição Química (%) por Faixa Granulométrica								
ALIMENTAÇÃO DA FLOTAÇÃO								
Amostra	Faixa Gr.	Fe	SiO₂	Al₂O₃	P	MnO₂	PPC	FeO
72	+0,15mm	46,7	27,2	0,21	0,080	0,026	5,51	0,6
	-0,15mm +0,075mm	37,3	42,8	0,16	0,050	0,017	3,54	0,7
	-0,075mm +0,044mm	33,0	49,8	0,16	0,040	0,012	2,64	0,6
	-0,044mm	39,2	40,6	0,19	0,050	0,015	2,96	0,7
77	+0,15mm	37,4	43,8	0,05	0,010	0,062	2,56	2,0
	-0,15mm +0,075mm	32,8	51,0	0,05	0,010	0,011	2,01	1,2
	-0,075mm +0,044mm	31,4	53,2	0,05	0,010	0,010	1,74	1,0
	-0,044mm	35,5	47,2	0,07	0,010	0,014	1,79	1,5
88	+0,15mm	41,3	37,0	0,13	0,030	0,053	3,71	1,2
	-0,15mm +0,075mm	36,6	44,9	0,12	0,020	0,042	2,63	1,1
	-0,075mm +0,044mm	47,1	30,0	0,14	0,020	0,039	2,51	0,9
	-0,044mm	60,3	10,5	0,16	0,020	0,034	3,09	1,1
91	+0,15mm	38,9	42,0	0,54	0,020	0,011	1,67	2,6
	-0,15mm +0,075mm	28,7	57,5	0,46	0,010	0,010	0,91	2,2
	-0,075mm +0,044mm	35,7	47,4	0,48	0,010	0,010	0,89	2,3
	-0,044mm	53,9	20,9	0,74	0,010	0,010	1,10	2,7
107	+0,15mm	44,5	34,1	0,12	0,060	0,029	1,98	0,4
	-0,15mm +0,075mm	28,9	57,6	0,09	0,030	0,019	0,90	0,4
	-0,075mm +0,044mm	36,1	47,5	0,09	0,030	0,015	0,64	0,5
	-0,044mm	53,9	22,1	0,11	0,030	0,014	0,70	0,5

A AGEO 77 é a amostra com menor teor de ferro no ROM (34,8%) e, após a deslamagem, perdeu ainda mais conteúdo metálico, permanecendo com 33,9% de ferro. Analisando somente a qualidade química do minério, supõe-se grande dificuldade no processo de concentração, devido ao baixo teor de ferro, que reflete em grande volume de sílica, requerendo altas dosagens de amina. Considerando as faixas granulométricas estudadas, o maior teor de Fe (37,4%) e, conseqüentemente, o menor teor de SiO₂ (43,8%), encontram-se na faixa mais grosseira, +0,15mm, onde há a tendência de ocorrer o menor grau de liberação do quartzo. Este fato poderá ser evidenciado no item 5.6. Os maiores teores de SiO₂ encontram-se nas faixas intermediárias, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm, com teores de 51,0% e 53,2%, respectivamente. Em relação aos demais teores, destaque para o teor de PPC nas faixas mais grosseiras, +0,075mm, levemente superiores a 2% enquanto que nas faixas mais finas os teores estão abaixo de 1,8%.

Conforme mencionado anteriormente, o minério da AGEO 88 foi aquele que perdeu maior conteúdo metálico na deslamagem, o teor de ferro caiu de 47,8% no ROM para 46,3% no underflow da deslamagem. O elevado teor de PPC da lama (6,85%) reflete na queda do PPC após a deslamagem, com teor de 2,99% no ROM reduzindo para 2,53% na alimentação da flotação. Na avaliação da qualidade química por faixa granulométrica, é notável que o teor de ferro encontra-se predominantemente na fração abaixo de 0,044mm, com teor de 60,3%. Na fração -0,075mm +0,044mm o teor de ferro também é elevado, 47,1%. Nesta amostra, o teor de PPC não segue o padrão do teor de ferro, pois o maior teor (3,71%) encontra-se na fração mais grosseira da amostra, +0,15mm. Na fração -0,044mm o teor de PPC é de 3,07% e nas frações intermediárias os teores são de 2,63% e 2,51%, respectivamente.

A AGEO 91 apresentou a maior queda do teor de Al₂O₃ do ROM para a alimentação da flotação, mas ainda assim é a amostra com o maior teor nesta etapa do processo, 0,64%. Com relação ao teor de ferro, conforme já mencionado, houve um enriquecimento relativo no underflow da deslamagem em comparação ao ROM, onde o teor de ferro aumentou de 38,1% para 40,7%. O teor de PPC dessa amostra já era muito baixo no ROM (1,06%) e caiu para 0,83% após a deslamagem. A estratificação granulométrica mostra que o teor de ferro é bem mais elevado na fração mais fina, com teor de 53,9%, assim como o teor de Al₂O₃, com valor de 0,74%. O teor de SiO₂ é inversamente proporcional ao teor de ferro e às demais variáveis, não ocorre grandes diferenças nas faixas granulométricas estudadas.

O minério da AGEO 107, assim com a maioria das amostras estudadas, também apresentou queda no teor de ferro após o processo de deslamagem, com teor de ferro de 39,8% na alimentação da flotação contra 40,5% no ROM. As demais variáveis apresentaram pouca diferença de teor entre o ROM e o underflow de deslamagem. O teor de ferro de 53,9% na fração mais fina da amostra (-0,044mm) é muito superior em relação às demais faixas. O teor de PPC é baixo na amostra como todo e apresenta o maior valor, de 1,98%, no material retido em 0,15mm. As demais variáveis exibem pouca diferença nas faixas granulométricas estudadas.

A granuloquímica das amostras revela um fato interessante para o estudo. As amostras originalmente classificadas como minérios anfíbolíticos, sendo semicompacto ou compacto, e que apresentaram os maiores valores de requerimento energético de moagem, AGEO 72 e 77, são aquelas que apresentam teores de ferro mais elevados nas frações mais grossa da amostra, +0,15mm, que tende a apresentar menor grau de liberação. Enquanto isso, as amostras originalmente mais finas, compostas essencialmente com hematita especular e hematita martítica e que tiveram os menores valores de requerimento energético de moagem, AGEO 88 e 91, apresentaram teor de ferro muito mais elevado na fração mais finas da amostra, -0,044mm. A AGEO 107, apesar de ser um minério semicompacto, segue a tendência das amostras mais finas compostas essencialmente com hematita especular e hematita martítica, e apresenta teor de ferro mais elevado na fração menor que 0,044mm.

Na tabela V.9 estão apresentadas as distribuições granulométricas das amostras, considerando as frações estudadas.

Tabela V.9 – Distribuição granulométrica das amostras após o processo de deslamagem.

Composição Química (%) por Faixa Granulométrica				
ALIMENTAÇÃO DA FLOTAÇÃO				
Amostra	Faixa Gr.	Massa (g) retida	% retido acumulada	% passante acumulada
72	+0,15mm	18	11	89
	-0,15mm +0,075mm	57	44	56
	-0,075mm +0,044mm	43	69	31
	-0,044mm	53	100	0
77	+0,15mm	15	13	87
	-0,15mm +0,075mm	38	45	55
	-0,075mm +0,044mm	27	67	33
	-0,044mm	39	100	0
88	+0,15mm	22	11	89
	-0,15mm +0,075mm	73	49	51
	-0,075mm +0,044mm	44	71	29
	-0,044mm	56	100	0
91	+0,15mm	18	10	90
	-0,15mm +0,075mm	58	42	58
	-0,075mm +0,044mm	43	65	35
	-0,044mm	64	100	0
107	+0,15mm	18	10	90
	-0,15mm +0,075mm	61	42	58
	-0,075mm +0,044mm	45	66	34
	-0,044mm	63	100	0

5.5.2 Composição mineralógica

Conforme mencionado no item 4.3.2, a análise mineralógica foi realizada por técnicas complementares, via microscopia de luz refletida (MLR), difração de raios-X e MLA.

Na tabela V.10 é apresentada a composição mineralógica da alimentação da flotação de cada uma das amostras obtida por estimativa visual por meio da microscopia de luz refletida. Os resultados estão normalizados considerando somente os óxidos/hidróxido de ferro, sendo identificados e quantificados os seguintes minerais e feições: hematita especular, hematita martítica, goethita, incluindo suas diversas formas, terrosa, maciça, botrioidal, e a magnetita.

De acordo com os critérios adotados pela Samarco, a definição e diferenciação dos tipos de minério baseia-se na composição mineralógica da alimentação da flotação. Assim é possível confirmar os tipos de minérios estudados, que foram previamente classificados pelas características e aspectos visuais.

Tabela V.10 – Composição mineralógica da amostra global do underflow da deslamagem (alimentação da flotação), via microscopia de luz refletida. HE: Hematita especular; HM: Hematita martítica; G: Goethita; MA: Magnetita

Composição Mineralógica (%)				
ALIMENTAÇÃO DA FLOTAÇÃO				
	HE	HM	G	MA
AGEO 72	6,8	30,2	59,1	4,0
AGEO 77	2,7	41,1	44,3	11,9
AGEO 88	19,5	32,1	44,0	4,4
AGEO 91	2,7	70,3	13,2	13,7
AGEO 107	51,6	28,2	15,0	5,2

Conforme descrito no item 3.5, os itabiritos anfíbolíticos são constituídos predominantemente por hematita martítica e goethita, em proporções similares, sendo

ora a martita predominante sobre a goethita ora a goethita é o mineral predominante. Além disso, é importante a constatação da presença de pseudomorfos de anfibólios na descrição visual ou na análise via microscopia ótica.

As amostras AGEO 72 e 77 foram previamente classificadas como sendo itabiritos anfibolítico-martítico. A composição mineralógica confirma a classificação. A AGEO 72 é constituída por 30,2% de hematita martítica e 59,1% de goethita. A hematita especular e a magnetita somam próximo a 10% da composição. A fotomicrografia da figura 5.13 exibe o aspecto geral do minério com destaque para partícula de hematita martítica com relictos de magnetita, indicando processo de martitização, partículas com cristais de goethita botrioidal associados a grãos de quartzo, em contato interlobado, caracterizando uma partícula mista tipo 4. Nota-se ainda a presença de uma partícula com goethita pseudomórfica de anfibólio e hematita martítica.

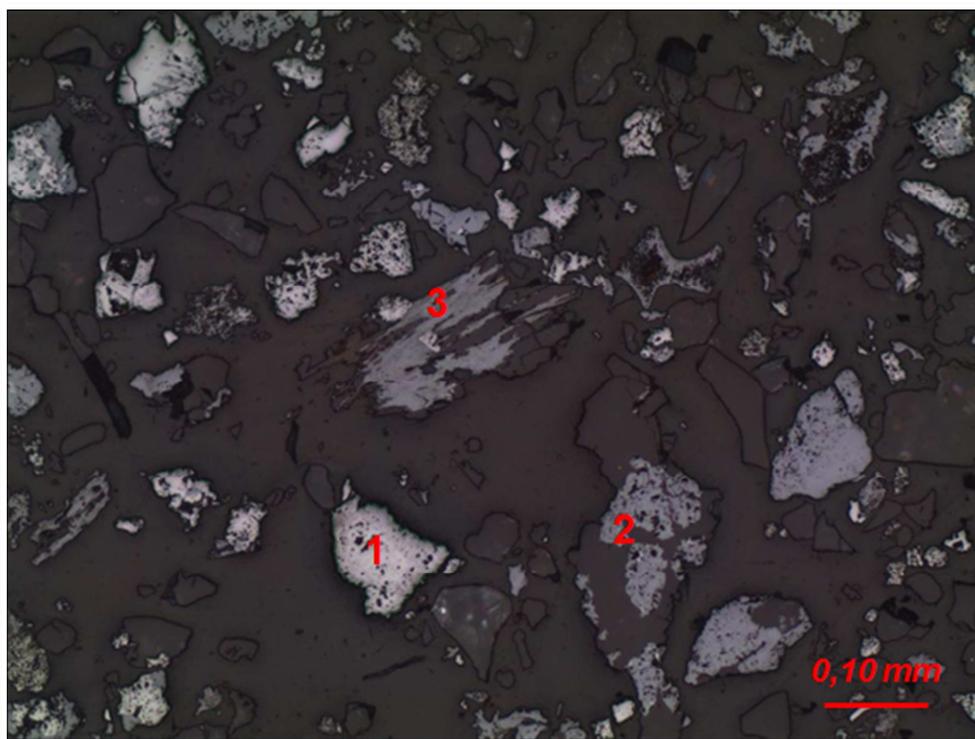


Figura 5.13 - Fotomicrografia da amostra AGEO 72 – Underflow da deslamagem – fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Hematita martítica com relictos de magnetita; 2 = Goethita botrioidal + quartzo; 3 = Goethita pseudomórfica de anfibólio + hematita martítica. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.

A composição mineralógica da AGEO 72, obtida no MLA, está apresentada na tabela V.11, junto com os resultados das demais amostras. Pelos teores normalizados,

considerando apenas os óxidos/hidróxido de ferro, é possível notar que, de acordo com a leitura do MLA, as hematitas e a magnetita correspondem a 50,2% da composição mineralógica da amostra enquanto que a goethita equivale a 49,8%.

Na microscopia ótica o teor de goethita (59,1%) foi levemente superior aos teores das hematitas mais magnetita (41%) enquanto que o MLA apresenta uma mesma proporção entre goethita e os demais óxidos de ferro. Apesar da diferença da composição mineralógica apresentada pelos métodos, ambas refletem tranquilamente a composição de um itabirito anfibolítico.

Tabela V.11 – Composição mineralógica da amostra global do underflow da deslamagem (alimentação da flotação), via MLA.

	Composição Mineralógica Total (%)			Composição Mineralógica Normalizada (%)	
	Hematitas + Magnetita	Goethita	Quartzo	Hematitas + Magnetita	Goethita
AGEO 72	28,3	28,1	43,1	50,2	49,8
AGEO 77	28,6	19,2	50,8	59,8	40,2
AGEO 88	35,2	30,1	34,6	53,9	46,1
AGEO 91	39,5	13,3	44,2	74,8	25,2
AGEO 107	40,2	11,5	47,5	77,8	22,2

Pelas fotomicrografias apresentadas na figura 5.14, obtidas no MEV, é possível observar uma partícula mista, exemplar de uma partícula mista complexa tipo 4, constituída por grãos de hematita martítica (HM) subédricos a anédricos, preservando em partes o formato da magnetita, envolvidos por uma massa de goethita (G) pseudomórfica de anfibólio, em contato com diversos grãos de quartzo (Q). A imagem obtida por elétrons retroespalhados (figura 5.17A) destaca as diferentes tonalidades de cinza distinguindo as fases que compõem a partícula e a imagem de elétrons secundários (figura 5.17B) ressaltam o relevo da partícula.

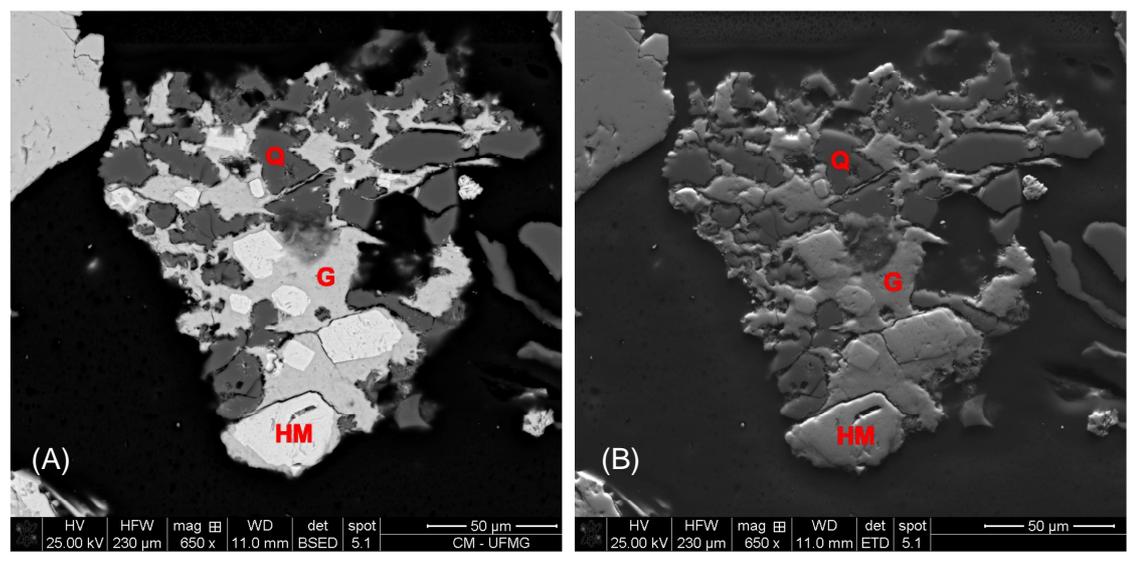


Figura 5.14 – Fotomicrografia da amostra AGEO 72 – Underflow da deslamagem – fração global. Destaque para uma partícula mista complexa tipo 4, composta por goethita pseudomórfica de anfibólio (G), grãos de hematita martítica (HM) e de quartzo (Q). (A) MEV- BSED, (B) MEV-ETD.

A AGEO 77 também é um itabirito anfibolítico-martítico sendo composto essencialmente por hematita martítica e goethita em proporções muito similares, 41,1% e 44,3%, respectivamente. A magnetita participa em 11,9% da composição da amostra. A fotomicrografia da figura 5.15 mostra o aspecto geral do minério após o processo de deslamagem, sendo possível notar a presença de goethita como pseudomórfica de anfibólio, destacado no número 5.

A fotomicrografia da figura 5.16 destaca uma partícula composta goethita pseudomórfica de anfibólio, hematita martítica e magnetita martitizada, reafirmando a tipologia dessa amostra como sendo um itabirito anfibolítico-martítico.

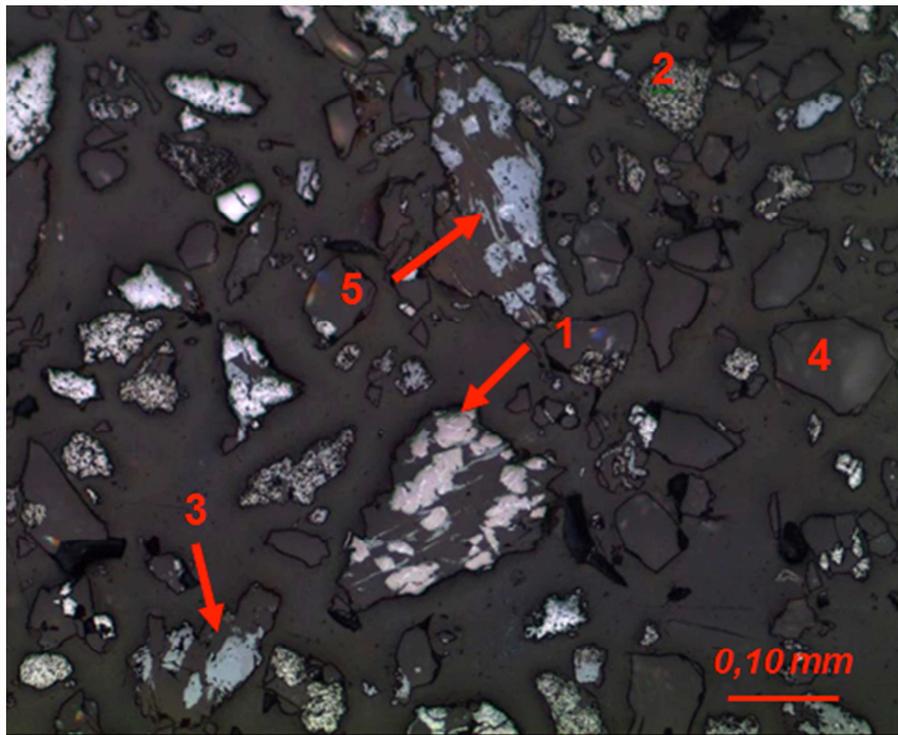


Figura 5.15 - Fotomicrografia da amostra AGE0 77 – Underflow da deslamagem – fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Magnetita martitzada; 2 = Hematita martítica; 3 = Goethita botrioidal; 4 = Quartzo; 5 = Goethita pseudomórfica de anfibólio. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.

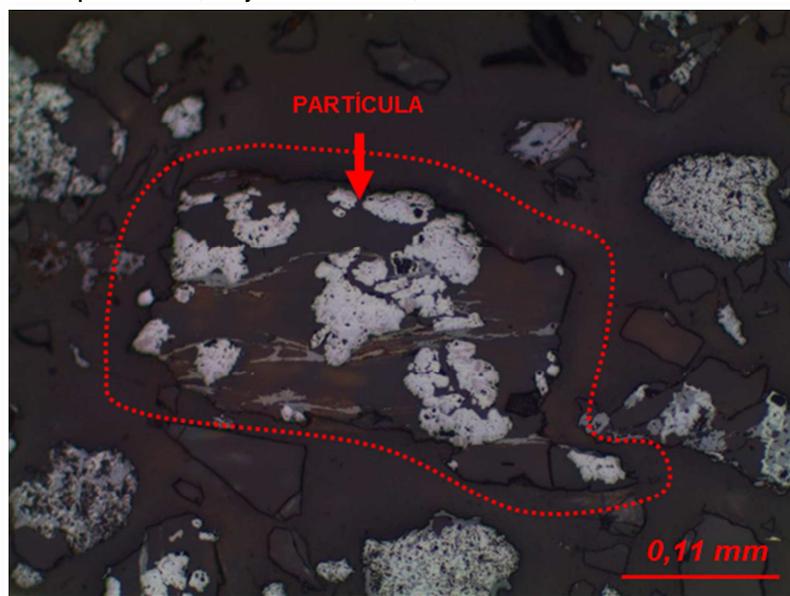


Figura 5.16 - Fotomicrografia da amostra AGE0 77 – Underflow da deslamagem – fração global. Partícula em destaque composta goethita pseudomórfica de anfibólio + hematita martítica + magnetita martitzada. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 20x, ocular de 10x.

Na figura 5.17 destaca-se uma partícula composta por quartzo, goethita botrioidal, hematita martítica e magnetita martitizada.

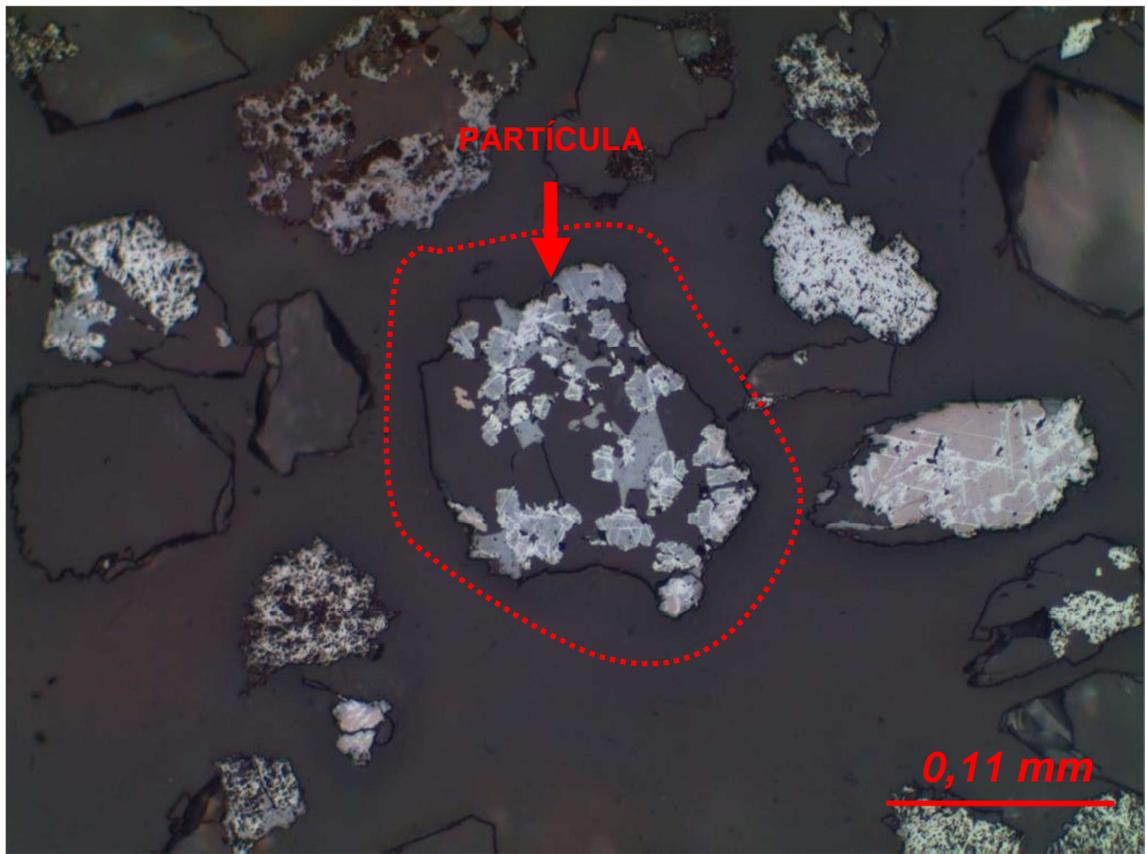


Figura 5.17 - Fotomicrografia da amostra AGEO 77 – Underflow da deslamagem – fração +0,075mm. Partícula composta por quartzo + goethita botrioidal + hematita martítica + magnetita martitizada. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 20x, ocular de 10x.

A composição mineralógica obtida na análise do MLA mostra que o minério da AGEO 77, após o processo de deslamagem, é constituído por 59,8% de hematitas/magnetita e 40,2% de goethita, considerando os dados normalizados. Em comparação à análise mineralógica realizada na microscopia ótica, a composição obtida em ambos os métodos são equivalentes, com um teor mais elevado de hematitas/magnetita (MLR = 55,7% e MLA = 59,8%) com menor teor de goethita (MLR = 44,3% e MLA = 40,2%).

De acordo com a caracterização mineralógica no MLR, a amostra AGEO 88 é um minério trimineralico sendo a goethita o mineral predominante com 44%, seguida da hematita martítica com 32,1% e pela hematita especular com 19,5%. A magnetita participa em apenas 4,4% da composição mineralógica. Este minério pode ser englobado no grupo do IMEG, itabirito martítico-especularítico-goethítico, mesmo a ordem de predominância não seguir exatamente a descrição do tipo. A fotomicrografia da figura 5.18 mostra o aspecto geral da amostra após o processo de deslamagem.

A figura 5.19 destaca uma partícula composta por goethita botrioidal com resíduos de hematita martítica associada aos grãos de quartzo e grãos de quartzo com inclusões de óxido de ferro.

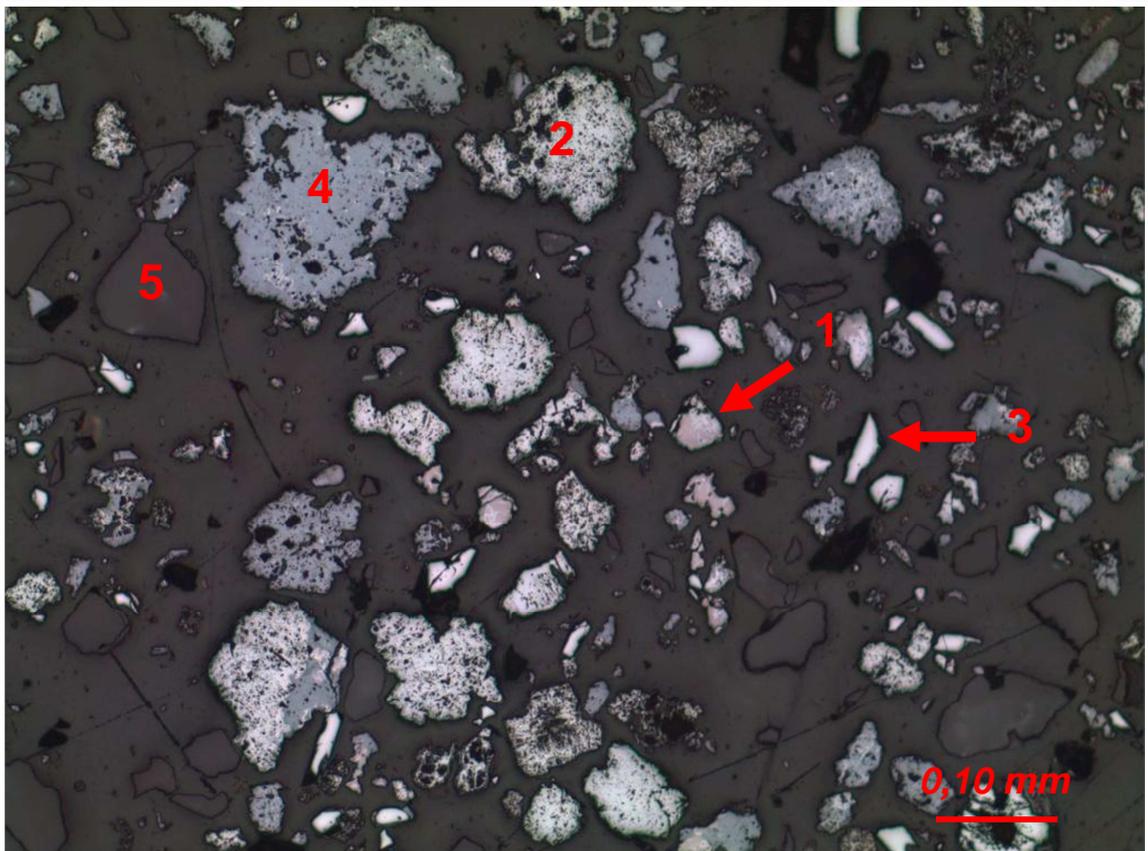


Figura 5.18 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 - Underflow da deslamagem: fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Magnetita martitizada; 2 = Hematita martítica; 3 = Hematita lamelar; 4 = Goethita botrioidal; e 5 = Quartzo. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.

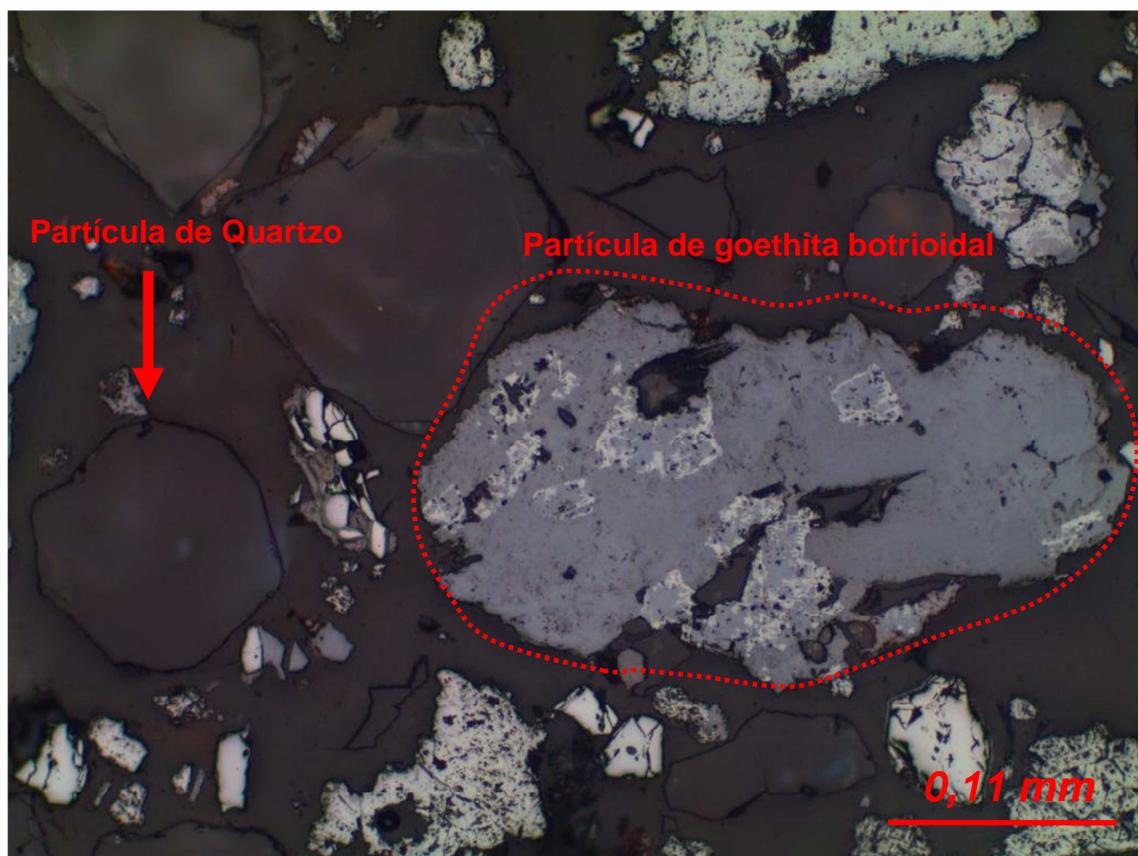


Figura 5.19 - Fotomicrografia da amostra AGE0 88 - UF - FRAÇÃO: GLOBAL. Partícula composta por goethita botrioidal com hematita martítica esqueletal associada aos grãos de quartzo. Partículas do tipo 2 - grãos de quartzo com inclusões de óxidos de ferro. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 20x, ocular de 10x.

A caracterização realizada no MLA revelou uma composição mineralógica muito semelhante aquela obtida na análise pelo MLR. A goethita constitui 46,1% da composição enquanto que as hematitas e magnetita somam 53,9%.

De acordo com os critérios adotados pela Samarco na definição dos tipos de minérios, somente a análise realizada no MLA não revelaria corretamente qual o tipo de minério a AGE0 88 corresponde, visto que, a diferenciação da hematita especular da hematita martítica é fundamental para definição dos tipos de minérios, visto que apresentam diferentes comportamentos nas etapas do processo (Costa, 1998).

A fotomicrografia da figura 5.20, obtida no MEV (elétrons retroespalhados), mostra o aspecto geral da amostra AGEO 88 após o processo de deslamagem.

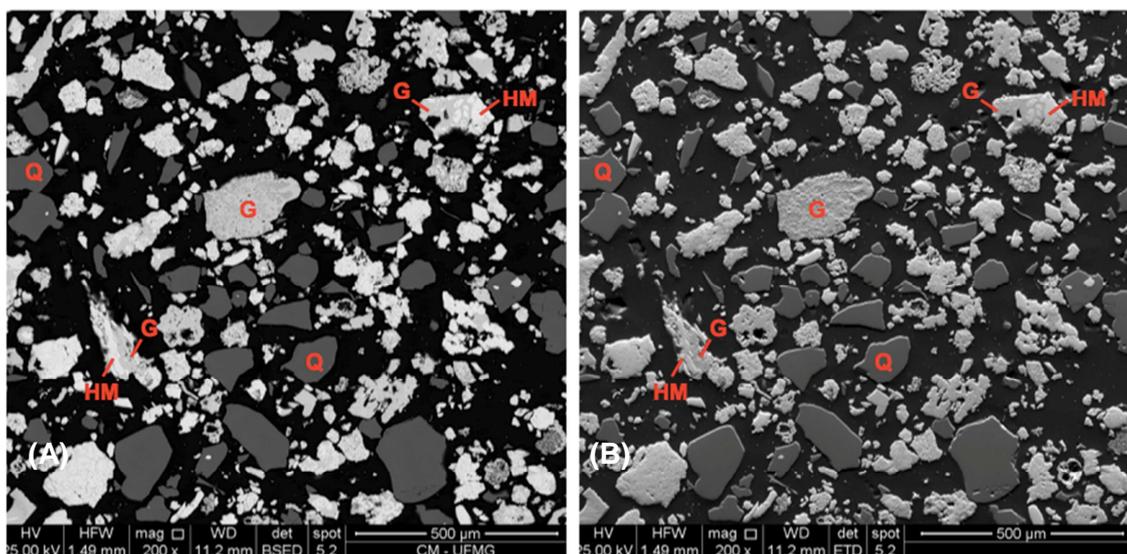


Figura 5.20 – Fotomicrografia da amostra AGEO 88 - Underflow da deslamagem: fração global. Aspecto geral do minério mostrando grãos de quartzo totalmente liberados, grãos de hematita martítica associados à goethita botrioidal e partículas liberadas de goethita. (A) MEV- BSED, (B) MEV-ETD.

A fotomicrografia apresentada na figura 5.21 exibe uma belíssima hematita martítica, com a hematita formada segundo os planos, ou entre os planos, octaédricos da magnetita, exibindo uma textura em treliça, típica do processo de martitização. A imagem foi obtida no MEV por elétrons retroespalhados.

A fotomicrografia da figura 5.22 exibe outra bela imagem mostrando relictos de hematita martítica, sob a forma esquelética, goethitizada, preservando alguns planos da textura em treliça, em meio a uma massa de goethita botrioidal. A imagem foi obtida no MEV por elétrons retroespalhados.

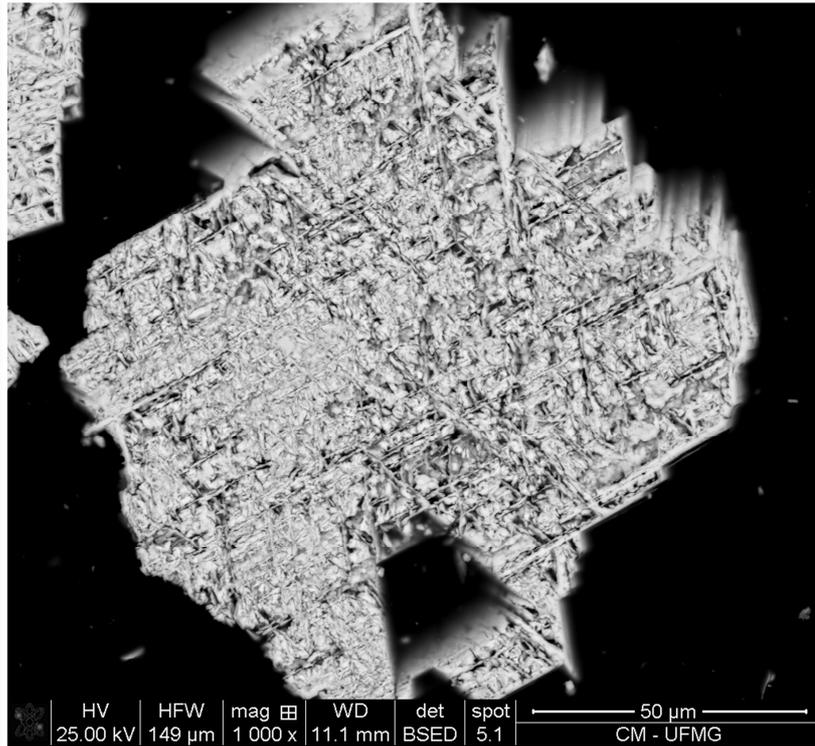


Figura 5.21 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 - Underflow da deslamagem: fração global. Belíssimo grão de hematita martítica exibindo sua textura típica em treliça. MEV- BSED.

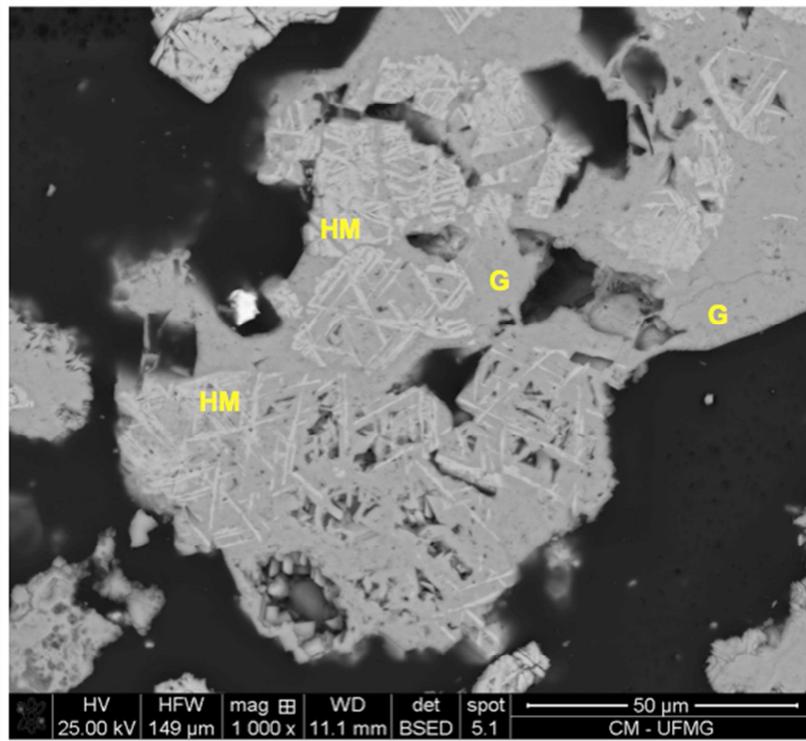


Figura 5.22 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 - Underflow da deslamagem: fração global. Belíssimo grão de hematita martítica, goethitizada, em meio a goethita botrioidal. MEV- BSED.

Segundo a análise mineralógica via microscopia ótica, a AGEO 91 se caracteriza por ser um minério essencialmente martítico, com o teor de hematita martítica de 70,3%. A goethita e a magnetita apresentam proporções similares, respectivamente, 13,2% e 13,7%. A hematita especular é inexpressiva na composição mineralógica. A fotomicrografia da figura 5.23 mostra diversas partículas de hematita martítica, sendo que em muitas delas encontram-se relictos de magnetita. Além da hematita martítica, é possível observar partículas de goethita botrioidal e quartzo.

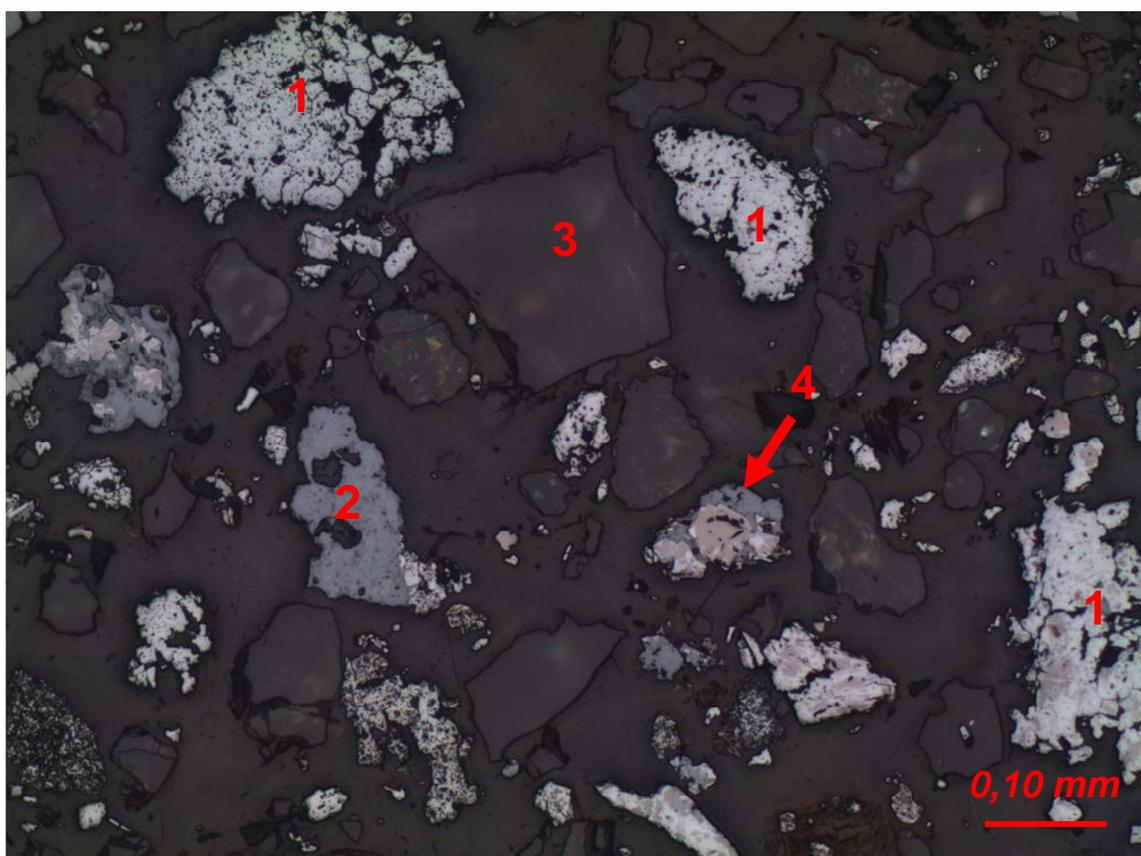


Figura 5.23 - Fotomicrografia da amostra AGEO 91 - Underflow da deslamagem - fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Hematita martítica; 2 = Goethita botrioidal; 3 = Quartzo; 4 = Magnetita martitizada + goethita botrioidal; e 5 = Quartzo. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.

A análise mineralógica realizada no MLA reforça o fato de que o minério da AGEO 91 é essencialmente hematítico, no caso, constituído majoritariamente por hematita martítica, conforme revelado na caracterização no MLR. O minério da AGEO 91, considerando somente os óxidos/hidróxido de ferro, é composto por 74,8% de

hematitas e magnetita e 25,2% por goethita. A análise realizada pelo MLA apresentou um teor mais elevado de goethita em relação aos resultados obtidos no MLR (13,2%).

É importante ressaltar que o minério da AGEO 91 foi o único, dentre os tipos de minérios estudados, que apresentou mais de 1% de outras fases minerais que constituem a ganga. Esta amostra de minério é composta também por 1,48% de caulinita e 0,72% de gibbsita, o que reflete no elevado teor de Al_2O_3 (0,64%), além de 0,6% de moscovita e 0,02% de rutilo. Estes minerais, apesar de pouco representativos na composição mineralógica, revela uma paragênese mineral distinta dos demais tipos de minérios estudados.

A fotomicrografia apresentada na figura 5.24, obtida por imagem de elétrons retroespalhados no MEV, exhibe uma partícula constituída por grãos subédricos a anédricos de hematitas martítica envolvidos por uma matriz de caulinita.

Este tipo de partícula é difícil de se encontrar nos minérios típicos de gênese por enriquecimento supergênico, porém, se mostrou até certo ponto comum neste minério estudado. Pelo contexto geológico local, onde ocorre este minério, acredita-se em uma componente hidrotermal na gênese dos minérios dessa região.

A fotomicrografia obtida por imagem de elétrons retroespalhados no MEV, apresentada na figura 5.25, observa-se outra partícula com as mesmas características, no entanto, com a presença de um grande grão de rutilo em meio à matriz de caulinita, que também envolve outros grãos de hematita.

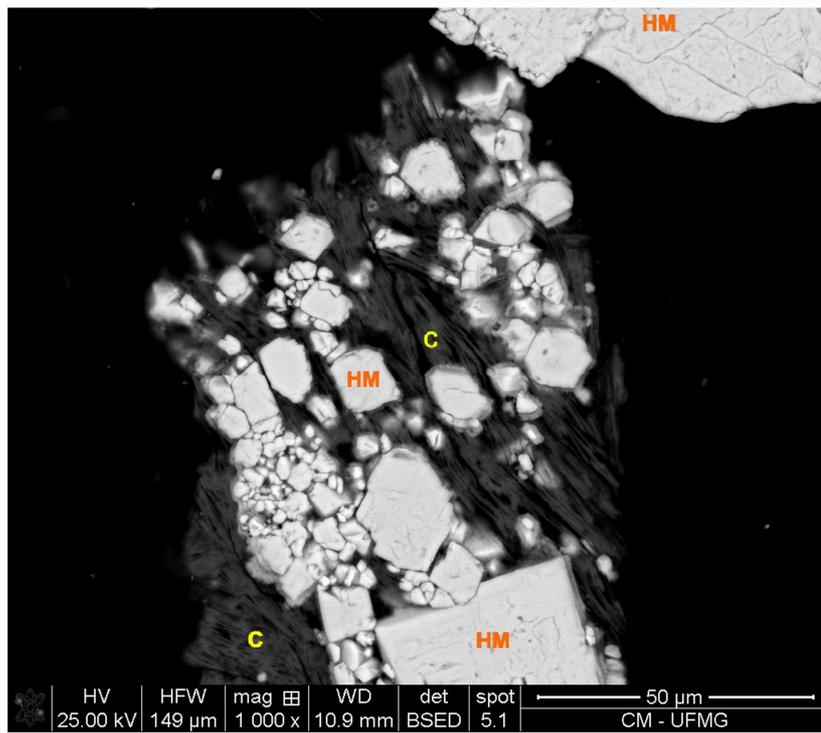


Figura 5.24 - Fotomicrografia da amostra AGE0 91 - Underflow da deslamagem: fração global. Partícula apresentando cristais de hematita martítica (HM) envolvidos por uma matriz de caulinita (C). MEV- BSED.

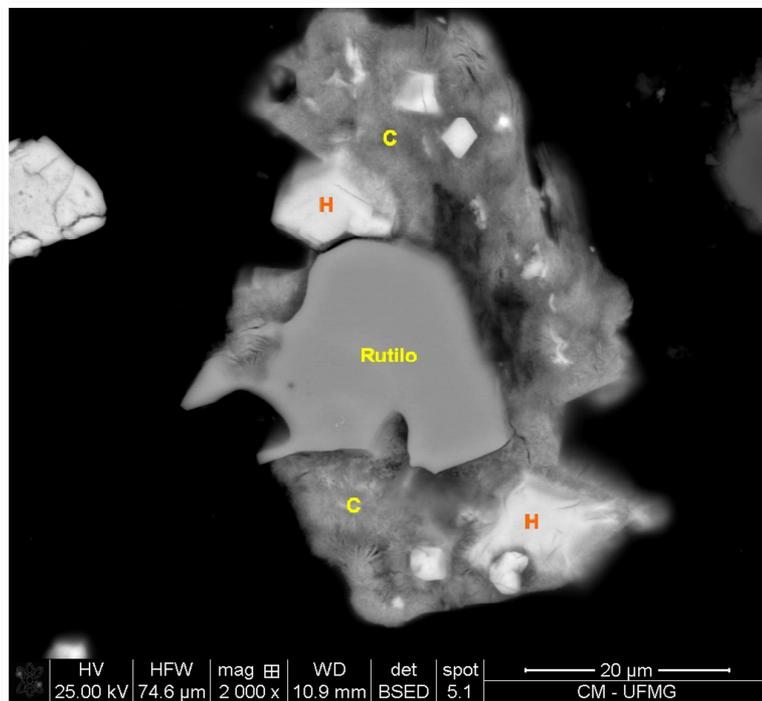


Figura 5.25 - Fotomicrografia da amostra AGE0 91 - Underflow da deslamagem: fração global. Partícula apresentando grão de rutilo e cristais de hematita (H) envolvidos por uma matriz de caulinita (C). MEV- BSED.

A partir da caracterização mineralógica pelo MLR é possível constatar que o minério da AGEO 107 é um típico itabirito especularítico-martítico, com a hematita especular como mineral predominante na composição mineralógica com 51,6% seguido pela hematita martítica com 28,2%. A goethita participa em 15% da composição mineralógica, um teor levemente superior aquele esperado para este tipo de minério. A magnetita ocorre com 5,2% da composição mineralógica. A fotomicrografia da figura 5.26 mostra o aspecto geral da alimentação da flotação da AGEO 107, com a presença dos três minerais predominantes na composição do minério, além do quartzo.

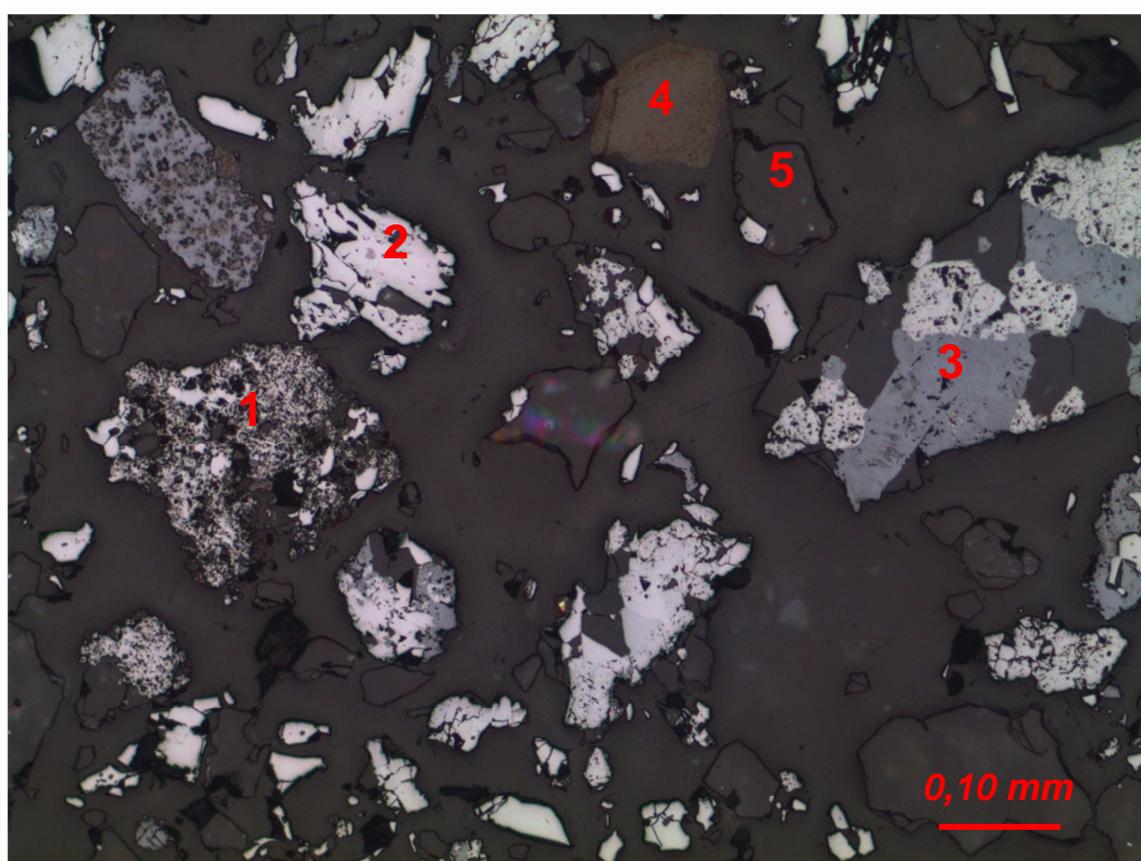


Figura 5.26 - Fotomicrografia da amostra AGEO 107 - Underflow da deslamagem - fração global. Aspecto geral do minério. 1 = Hematita martítica; 2 = Hematita lamelar; 3 = Goethita botrioidal; 4 = Goethita terrosa; e 5 = Quartzo. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.

Pelo MLA, o minério da AGEO 107 apresentou um percentual um pouco mais elevado de goethita em relação ao MLR, com teor de 22,2%. As diversas morfologias da

hematita e a magnetita somam 77,8%. Novamente, considerando apenas os resultados do MLA não seria possível determinar o tipo de minério, conforme critério adotado pela Samarco, visto que a proporção entre a hematita especular e a hematita martítica é primordial para a definição do tipo de minério neste caso.

A fotomicrografia da figura 5.27, obtida no MEV por elétrons retroespalhados, destaca uma partícula mista constituída por hematita especular, hematita martítica, goethita e quartzo.

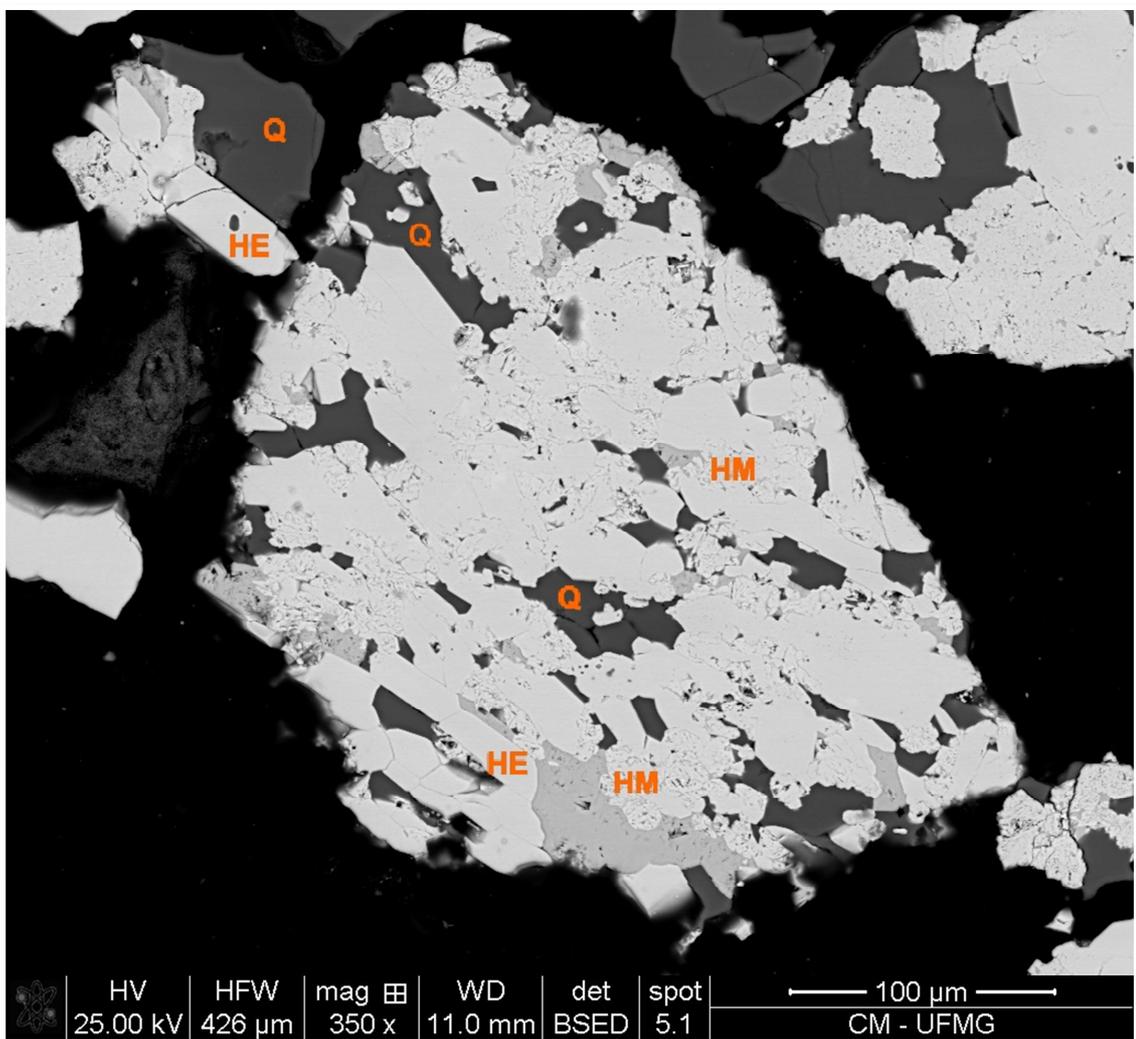


Figura 5.27 - Fotomicrografia da amostra AGEO 107 - Underflow da deslamagem: fração global. Partícula mista constituída por hematita especular (HE), hematita martítica (HM), goethita (G) e quartzo (Q).. MEV- BSED.

É importante ressaltar que, na caracterização mineralógica realizada no MLA, foram pouquíssimas partículas que não foram classificadas em alguma das fases que constava na lista de minerais. Para a AGEO 72, o *unknown* foi de 0,11%, para a AGEO 77 foi de 0,22% enquanto que para a AGEO 88 o *unknown* foi de apenas 0,05%. Para a AGEO 91 o *unknown* foi de 0,14% e para a última amostra, AGEO 107, o *unknown* foi de 0,12%. Estes valores estão excelentes visto que a equipe responsável pelo MLA na UFMG considera que *unknown* abaixo de 2% é satisfatório.

5.6 Estudo do grau de liberação na alimentação da flotação

Os vários tipos de minério se apresentam em diferentes condições para o processo de concentração, pois respondem de maneira distinta ao processo de cominuição e de deslamagem, conforme suas características intrínsecas, tais como suas propriedades físicas, composição química e mineralógica, incluindo a microestrutura do minério.

Dentre as particularidades de cada tipo de minério, destaca-se o grau de liberação do quartzo e a distribuição dos tipos de partículas mistas e livres que cada amostra exhibe após os processos de cominuição e de deslamagem.

Conforme discutido no item 5.4, cada tipo de minério apresentou comportamento totalmente distinto ao processo de cominuição, traduzido pelos diferentes valores de requerimento energético de moagem, refletindo em condições diferenciadas de cada minério no que diz respeito ao grau de liberação e à distribuição dos tipos de partículas mistas e livres.

As características do minério tendem a se alterar após o processo de deslamagem, em relação ao produto da moagem. De acordo com o exposto no item 5.5, alguns tipos de minério tendem a perder massa e/ou conteúdo metálico no processo de deslamagem. As perdas irão ocorrer de acordo com a composição da lama, como reflexo da geração de ultrafinos no processo de cominuição.

O estudo detalhado do grau de liberação e da distribuição dos tipos de partículas mistas e livres nas amostras da alimentação da flotação teve como propósito fundamentar o entendimento do comportamento do minério no processo de flotação.

Desta forma, cada uma das amostras do underflow da deslamagem foi submetida à caracterização mineralógica, via microscopia ótica, para quantificação do grau de

liberação e identificação dos tipos de partículas mistas e livres presentes na amostra, considerando a alíquota global e quatro faixas granulométricas (+0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm).

As mesmas seções polidas estudadas na microscopia ótica, considerando somente as alíquotas globais da alimentação da flotação, foram submetidas a uma caracterização mineralógica no MLA. De todas as informações levantadas nas análises do MLA destaca-se o valor do grau de liberação, calculado segundo método de Gaudin nos dados de liberação por composição, curvas do espectro de liberação do quartzo, estudo das associações mineralógicas, distribuição do tamanho das partículas e distribuição do tamanho dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita na amostra.

É importante salientar que, para o cálculo de grau de liberação, foram consideradas como partículas livres aquelas com mais de 90% de quartzo na composição da partícula. Para a quantificação das partículas mistas foi considerada a proporção média do teor de quartzo na composição dessas partículas, determinada pelo MLA. Por exemplo, na AGEO 88, para a classe de composição do quartzo de $5\% < x \leq 10\%$ foram contabilizadas 14 partículas com proporção média de quartzo de 8,83% na composição das partículas.

O minério da AGEO 88 apresentou os melhores resultados de grau de liberação após o processo de moagem, conforme apresentado no item 5.4. Na figura 5.28 estão apresentados os resultados do estudo da liberação mineral da alimentação da flotação, via microscopia ótica, com a quantificação do grau de liberação do quartzo ($G.L_{qtz}$) e os gráficos da distribuição dos tipos de partículas mistas e livres (gráficos de setores ou “pizza”), para a alíquota global e para cada uma das frações granulométricas estudadas.

O grau de liberação do quartzo para a alíquota global é igual a 90,5%, um bom valor de grau de liberação porém um pouco abaixo da expectativa para um minério que apresentou comportamento tão favorável no processo de cominuição, onde obteve 98,4% como menor valor de grau de liberação, nas alíquotas da alimentação da moagem e moagem em 5 minutos (figura 5.8).

A análise realizada no MLA forneceu resultado de grau de liberação do quartzo de 91,2% (tabela V.12), levemente superior ao valor obtido pelo MLR.

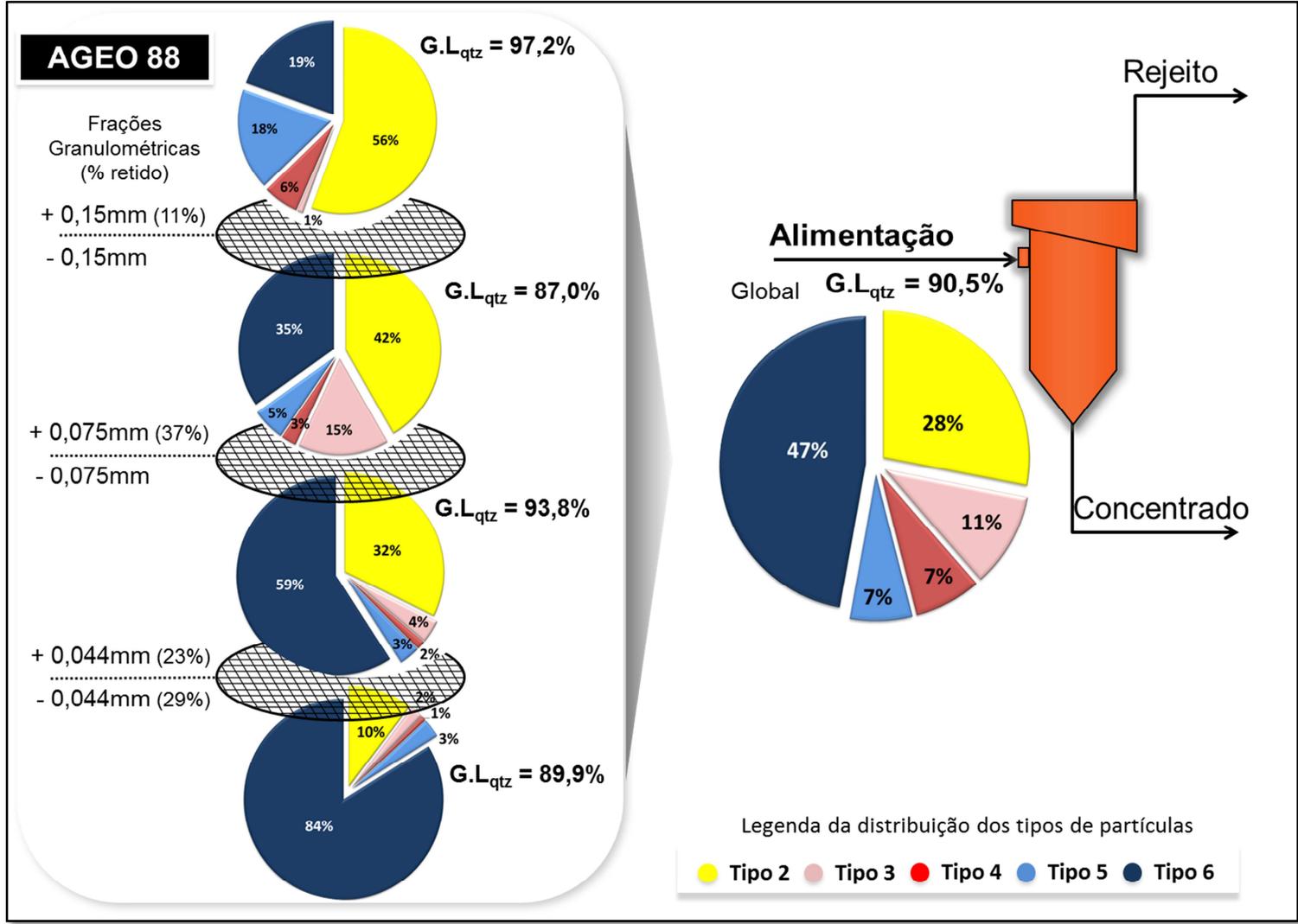


Figura 5.28 – AGEO 88: Gráficos de setores com a distribuição dos tipos de partículas livres e mistas e valores de grau de liberação na alimentação da flotação, alíquota global e nas frações +0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm.

Tabela V.12 – Grau de liberação do quartzo da amostra global do underflow da deslamagem (alimentação da flotação), via microscopia de luz refletida.

Grau de Liberação do quartzo (%)		
	MLR	MLA
AGEO 72	89,0	90,4
AGEO 77	78,6	74,1
AGEO 88	90,5	91,2
AGEO 91	92,4	93,7
AGEO 107	88,6	90,4

Com relação à distribuição dos tipos de partículas, é possível observar que as partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro são predominantes e somam 54%, sendo que 47% correspondem às partículas de óxido ou hidróxido de ferro totalmente liberadas e que outros 7% condizem a partículas tipo 5, ou seja, majoritariamente compostas por óxidos/hidróxido de ferro com algumas inclusões de quartzo. As partículas de quartzo liberadas equivalem a 28% do total de partículas. Desta forma, o total de partículas liberadas na alimentação da flotação para a AGEO 88 é de 82%. As partículas mistas somam 18%, sendo 11% de partículas mistas tipo 3 e 7% de partículas mistas tipo 4.

Em um primeiro momento, o percentual de 18% de partículas mistas na alimentação da flotação é um valor que pode ser julgado como elevado para uma amostra que apresentou grau de liberação de 90,5%, sendo um tipo de minério tido como referência, que traz a expectativa de uma excelente performance no processo de flotação. Desta forma, é importante detalhar o estudo das partículas mistas, identificando a distribuição da composição mineralógica dessas partículas para verificar se há maior participação de quartzo ou de óxidos/hidróxido de ferro na composição dessas partículas.

Pela metodologia utilizada na quantificação do grau de liberação, é possível estabelecer o percentual de minerais úteis e não úteis na composição das partículas

mistas. Os gráficos da figura 5.29 apresentam a distribuição do percentual de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas.

Considerando o total de partículas mistas na alíquota global da alimentação da flotação, é possível observar que 76% das partículas são compostas com mais de 50% de óxidos/hidróxido de ferro. Apenas 24% das partículas mistas são constituídas essencialmente de quartzo.

Analisando separadamente os tipos de partículas mistas, observa-se que 87% das partículas mistas tipo 3 são compostas essencialmente por óxidos/hidróxido de ferro (>50%) e somente 13% são compostas predominantemente de quartzo. Já nas partículas mistas complexas tipo 4, quase 60% das partículas são compostas majoritariamente por óxidos/hidróxido de ferro (entre 50% e 90%).

As partículas mistas com composição mineralógica predominante por óxidos/hidróxido de ferro sugerem que, no processo de flotação, estas partículas tendem a posicionar-se no concentrado. Desta maneira, poderá ocorrer algum prejuízo na qualidade do concentrado obtido, devido a presença do quartzo na composição das partículas mistas. Caso contrário, haverá perda de recuperação metálica pela composição majoritária de óxidos e hidróxido nas partículas mistas carregadas para o rejeito.

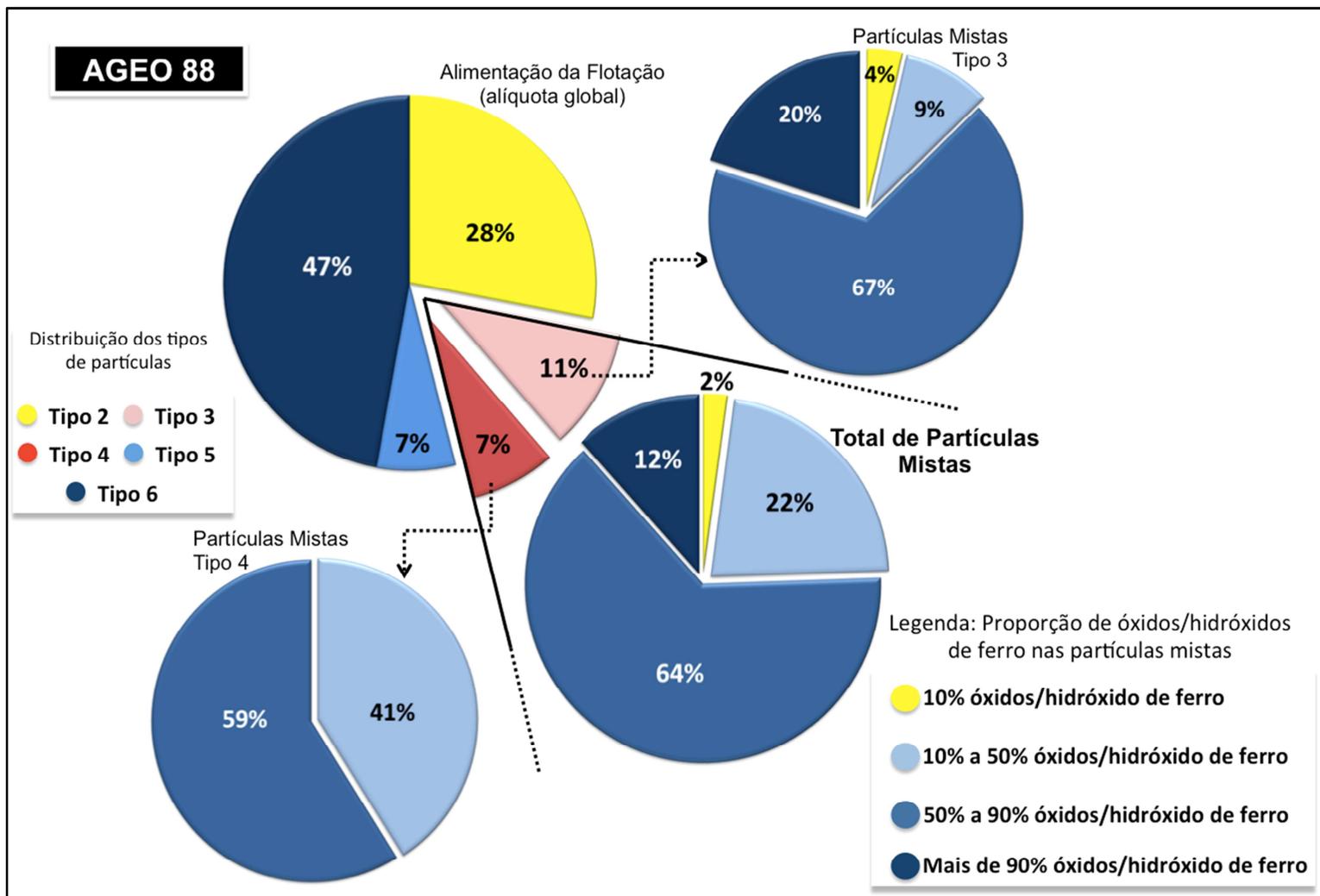


Figura 5.29 - Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas da alimentação da flotação, alíquota global, AGEO 88.

Pelo estudo do grau de liberação por faixa granulométrica, é possível observar uma variação no valor do grau de liberação entre as frações (figura 5.28). Curiosamente, na fração mais grosseira da amostra (+0,15mm) ocorre o melhor valor de grau de liberação, 97,2%, enquanto que na fração mais fina (-0,044mm) o grau de liberação é de 89,9%. Esta diferença de valores do grau de liberação nas frações mais extremas da amostra é uma condição inversa ao que, intuitivamente, se imagina, pois a tendência é que nas frações mais finas da amostra as fases minerais estariam mais liberadas do que nas frações mais grosseiras. A distribuição dos tipos de partículas e a qualidade química e mineralógica podem explicar esta “discrepância”. Na fração retida em 0,15mm, que corresponde a 11% da amostra (especificação da moagem), existe grande quantidade de quartzo na composição mineralógica, o que reflete no teor de SiO₂ de 37% (tabela V.8). Todavia, 56% das partículas são de quartzo livres e somente 7% são de partículas mistas, daí o elevado valor do grau de liberação. Na fração passante em 0,044mm, que equivale a 29% da amostra, a quantidade de quartzo é muito pequena, traduzindo no teor de SiO₂ de apenas 10,5%. Do total de partículas nesta fração, 10% correspondem a partículas liberadas de quartzo e 3% são de partículas mistas. A proporção de partículas mistas para a quantidade de partículas livres de quartzo é relativamente maior do que na fração +0,15mm, daí o menor valor de liberação.

Nas frações intermediárias da amostra (-0,15mm +0,075mm e -0,075mm +0,044mm) o grau de liberação é de 87% e 93,8%, respectivamente. Estas frações correspondem a 37% e 23% da amostra, nesta ordem.

Em resumo, os resultados do grau de liberação apresentam uma alternância entre as faixas estudadas, com valores de 97,2%, 87,0%, 93,8% e 89,9%.

Com relação à distribuição dos tipos de partículas mistas e livres nota-se que a quantidade de quartzo livre decresce na medida em que reduz a granulometria da amostra, com valores de 56%, 42%, 32% e 10%, para as respectivas frações. Inversamente proporcional, a participação de partículas livres de óxidos/hidróxido de ferro, tipo 5 e 6, aumentam com a diminuição da granulometria, com valores de 37%, 40%, 62% e 87%, para as frações +0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm.

A distribuição das partículas livres de quartzo e de óxidos/hidróxido de ferro nas frações estudadas reflete a composição química da amostra apresentada na tabela V.8 onde, a fração mais grosseira (+0,15mm) está com o menor teor de ferro (41,3%),

que tende a aumentar até a fração -0,044mm com teor de ferro de 60,3%. Em contrapartida, o teor de SiO₂ é maior na fração na mais grosseira da amostra (+0,15mm) tendendo a decrescer até a fração mais fina (-0,044mm) da amostra, saindo de um teor de SiO₂ de 37% chegando a 10,5%.

As partículas mistas tipo 4 e 3 apresentam tendência de decrescer à medida que diminui a granulometria, com exceção da fração -0,15mm +0,075mm em que as partículas mistas tipo 3 aumentam consideravelmente com relação às demais frações. As partículas mistas somam 7% na fração mais grosseira da amostra (+0,15mm), 6% na fração -0,075mm +0,044mm e chegam a apenas 3% no passante em 0,044mm.

No caso da fração -0,15mm +0,075mm a quantidade de partículas mistas tipo 3 é de 15% sendo que em 94% dessas partículas apresentam composição mineralógica predominantemente de óxido de hidróxido de ferro (figura 5.30).



Figura 5.30 – Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas tipo 3, alimentação da flotação, alíquota -0,15mm +0,075mm.

O estudo do grau de liberação da alimentação da flotação do minério da AGEO 88 por faixa granulométrica mostrou que, neste caso, há uma tendência geral do aumento da proporção de partículas livres à medida que a granulometria torna-se mais fina. No caso desta amostra, há também uma segregação composicional após o processo de moagem e deslamagem, com a predominância do quartzo nas frações mais grosseiras da amostra e dos minerais de óxidos/hidróxido de ferro nas frações mais finas.

Com relação à caracterização mineralógica realizada no MLA, conforme citado anteriormente (tabela V.12) o grau de liberação calculado para o minério da AGEO 88 foi de 91,2%.

Na figura 5.31 encontra-se o gráfico com o espectro de liberação do quartzo com a distribuição acumulada das partículas pela classe de composição de quartzo na partícula. Pelo gráfico é possível observar que grande parte das partículas da amostra (97%) apresentam mais de 90% de quartzo em sua composição mineralógica, consideradas liberadas no cálculo de liberação, refletindo no bom valor de grau de liberação para esta amostra.

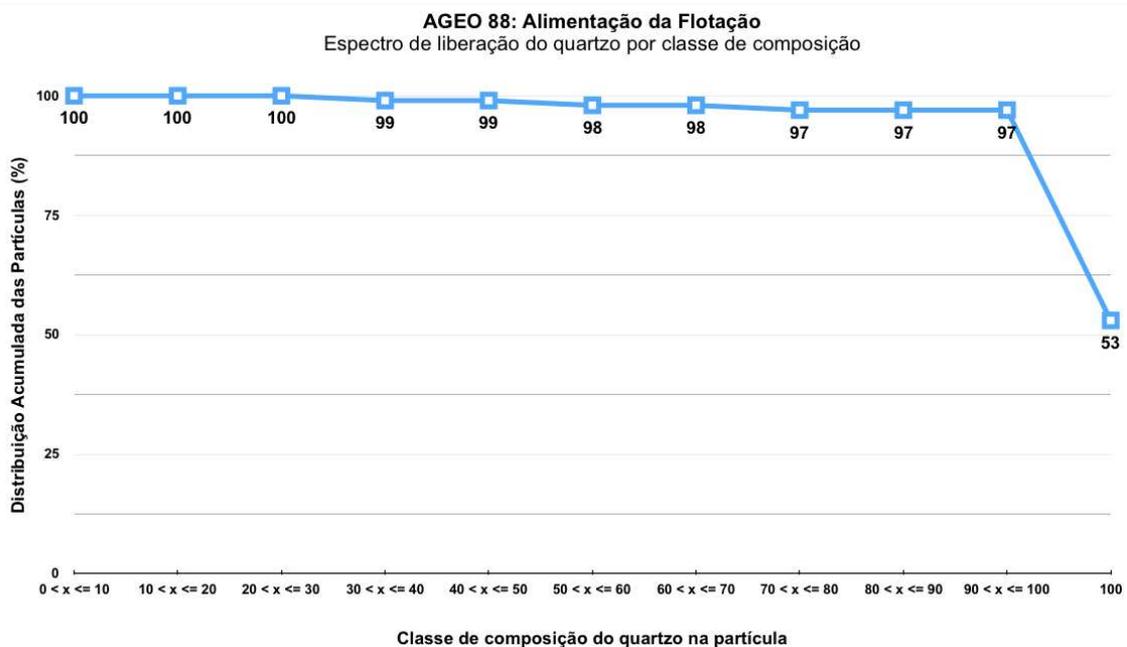


Figura 5.31 – Espectro de liberação do quartzo por classe de composição. AGEO 88: Alimentação da flotação, alíquota global.

O gráfico apresentado na figura 5.32 exibe a curva granulométrica das partículas, mistas e livres, da AGEO 88. Considerando as malhas de controle usualmente utilizadas na Samarco, é possível observar que 90,9% das partículas são passantes em 0,15mm (150 μ m), conforme especificação da moagem, e que 26,8% das partículas estão abaixo de 0,044mm (44 μ m).

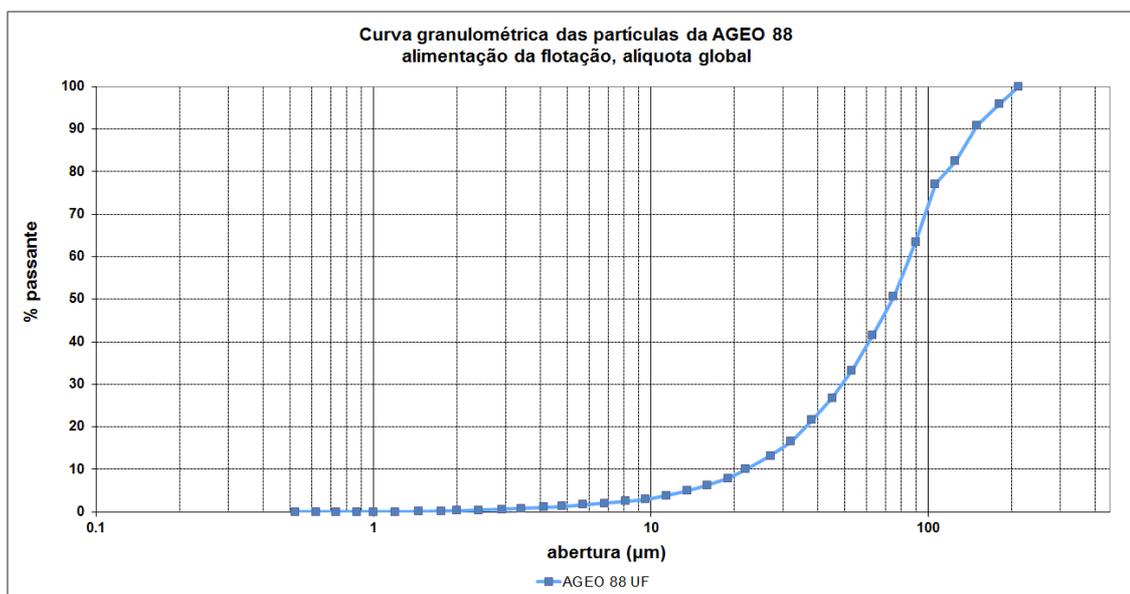


Figura 5.32 – Curva granulométrica das partículas livres e mistas da AGEO 88, alimentação da flotação, alíquota global.

As curvas granulométricas dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita estão apresentadas na figura 5.33. Os grãos de hematitas/magnetita se apresentam como os mais finos, com 100% dos grãos passante em 0,15mm (150 μ m) e 48% passante em 0,044mm (44 μ m). A goethita ocorre em grãos mais grosseiros do que as hematitas e magnetita, com 87% passante em 0,15mm (150 μ m) e 45% passante em 0,044mm (44 μ m). O quartzo constitui os grãos mais grosseiros da amostra, com 89% em 0,15mm (150 μ m) e apenas 11% passante em 0,044mm (44 μ m).

Cabe ressaltar que as distribuições granulométricas construídas a partir dos dados do MLA são distintas de distribuições granulométricas obtidas em peneiramento. Devido ao desvio estereológico, há uma tendência de obter uma granulometria mais fina em relação ao peneiramento.

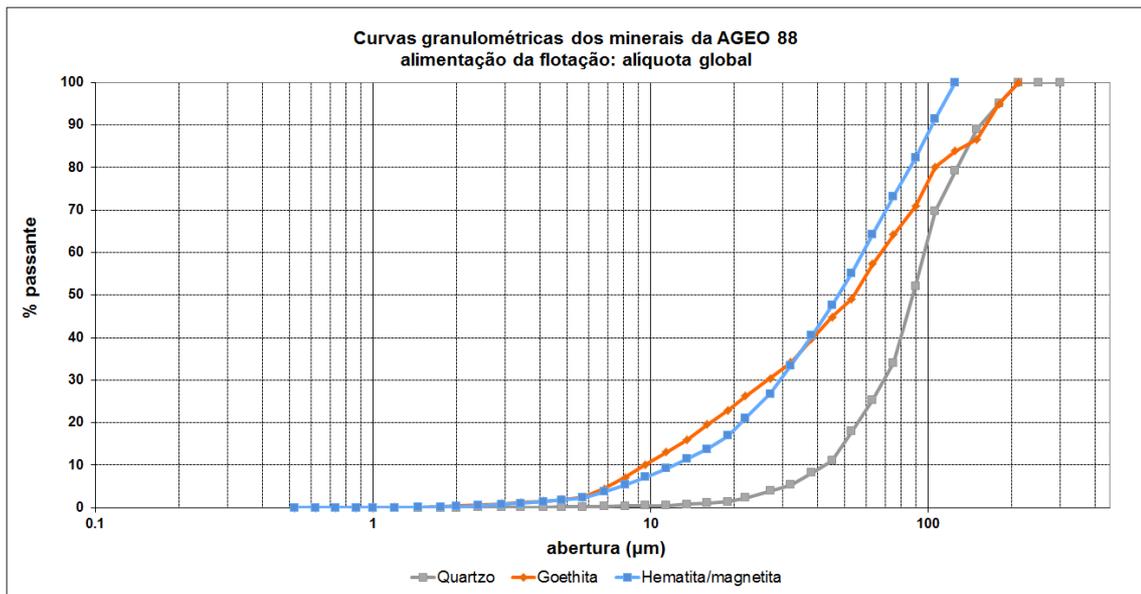


Figura 5.33 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 88, alimentação da flotação, alíquota global.

O MLA permite uma análise extremamente interessante das associações mineralógicas, considerando associações binárias. Nos gráficos de setores apresentados na figura 5.34 é possível analisar as associações mineralógicas do quartzo, das hematitas/magnetita e da goethita.

Dos grãos de hematitas/magnetita, 59% apresentam superfície livre, ou seja, não estão associados a nenhuma fase, 41% estão associadas a goethita e menos do que 1% estão associados ao quartzo. Com relação à goethita, 57% se encontram com superfície livre e 43% se encontram associadas a hematitas/magnetita.

Analisando as associações mineralógicas do quartzo, é possível entender o elevado grau de liberação desta amostra pois, 98% dos grãos de quartzo se encontram com superfície livre e apenas 1% estão associados a hematitas/magnetita e a goethita.

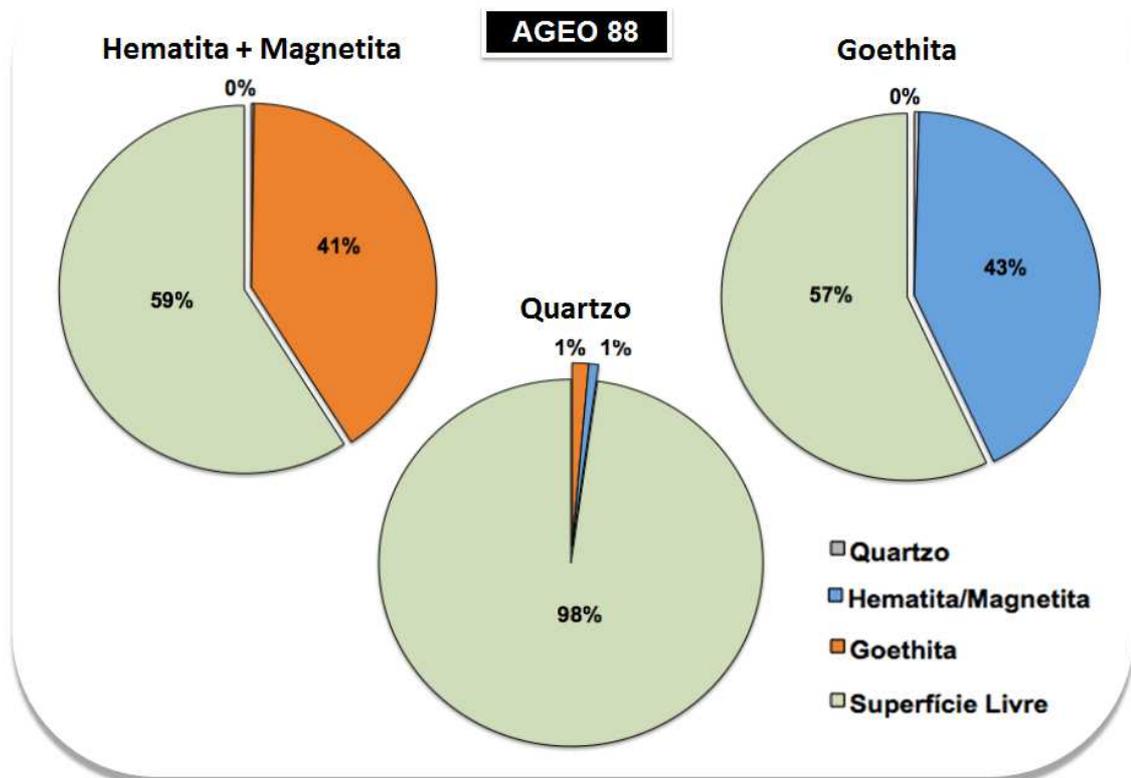


Figura 5.34 – Gráficos com as associações mineralógicas das principais fases constituintes do minério da AGEO 88, alimentação da flotação, alíquota global.

O minério da AGEO 72, na alíquota global da alimentação da flotação, apresentou grau de liberação de 89% (figura 5.35 e tabela V.12) pela caracterização no MLR, valor semelhante ao da AGEO 88 (90,5%). Pelo MLA, o grau de liberação obtido foi de 90,4% (tabela V.12), condizente ao valor determinado no MLR.

Apesar do valor próximo de grau de liberação, a distribuição dos tipos de partículas foi muito distinta com relação a AGEO 88. Há uma predominância de partículas liberadas de quartzo (41%) em relação às partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro, tipos 5 e 6, que somam 30%. As partículas mistas correspondem a 29% sendo que 20% são partículas mistas tipo 3 e 9% são partículas mistas complexas tipo 4 (figura 5.35).

A maior participação de partículas mistas na alimentação da flotação pode significar dificuldades na obtenção de um concentrado com qualidade mais restritiva, com menor teor de SiO₂. As partículas mistas podem não apresentar boa seletividade, se posicionando de forma aleatória no concentrado ou no rejeito, dependendo da composição mineralógica, do tamanho e da forma das partículas.

Conforme demonstrado na figura 5.36, as partículas mistas são compostas predominantemente por óxidos/hidróxido de ferro, em relação ao quartzo. Observa-se que 69% das partículas mistas apresentam mais de 50% de óxidos e hidróxido em sua composição, que 24% destas possuem menos de 50% de óxidos e hidróxido e que 7% das partículas mistas apresentam mais de 90% de quartzo na sua composição mineralógica.

As partículas mistas tipo 3 apresentam distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro na composição mineralógica muito semelhante ao total de partículas mistas. As partículas mistas tipo 4 apresentam em sua maioria (71% das partículas) composição predominantemente de óxidos/hidróxido de ferro, com mais de 50%.

Há um predomínio de partículas mistas compostas majoritariamente por óxidos/hidróxido de ferro, que tenderão a estar posicionadas no concentrado após o processo de flotação. Contudo, cerca de 31% das partículas são compostas predominantemente por quartzo, e estas tenderão a seguir para o flotado. Assim sendo, haverá prejuízos na qualidade do concentrado obtido, com elevado teor de SiO_2 , e prejuízos na recuperação metálica.

Analisando o grau de liberação e a distribuição dos tipos de partículas livres e mistas por faixa granulométrica (figura 5.35), é possível observar que a condição apresentada em cada fração é bastante distinta. No retido em 0,15mm, que corresponde a 11% da amostra, o grau de liberação é de apenas 47,4%, mas que vai aumentando nas frações mais finas da amostra, com valores de 64,8% na fração -0,15mm +0,075mm, 84,7% em -0,075mm +0,044mm chegando a 95,1% na fração passante em 0,044mm. Os valores de grau de liberação indicam que, para este tipo de minério, só é possível obter grau de liberação maior do que 90% na malha de 0,044mm.

Com relação à distribuição dos tipos de partículas, constata-se que o percentual de partículas liberadas de quartzo aumenta quanto mais fina a granulometria do minério, seguindo a tendência do valor do grau de liberação. Na fração +0,15mm são 22% de partículas de quartzo liberadas, 31% na fração -0,15mm +0,075mm, aumentando para 47% na fração -0,075mm +0,044mm chegando a 53% de quartzo livre no passante em 0,044mm. O mesmo comportamento ocorre com as partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro, com 17% no retido em 0,15mm, 21% na fração -0,15mm +0,075mm, 28% na fração -0,075mm +0,044mm e 39% na fração mais fina da amostra, passante em 0,044mm.

Consequentemente, se as partículas liberadas aumentam à medida que a amostra torna-se mais fina, as partículas mistas, tipo 3 e 4, decrescem com a diminuição da granulometria. Na fração +0,15mm são 58% de partículas mistas, sendo 27% de partículas tipo 3 e 31% de partículas complexas tipo 4, demonstrando uma condição totalmente desfavorável ao processo de flotação. Na fração -0,15mm +0,075mm a proporção de partículas mistas soma 45% sendo que as partículas mistas tipo 3 correspondem a 32% e as partículas tipo 4 a 13%, apresentando ainda uma condição desfavorável. É importante salientar que essas frações mais grosseiras, com condições desfavoráveis ao processo de flotação, correspondem a 44% da amostra.

Na fração -0,075mm +0,044mm as partículas mistas tipo 3 correspondem a 18% enquanto que as partículas tipo 4 equivalem a 5%, totalizando 23%. Na fração mais fina da amostra (-0,044mm) a condição já é mais adequada ao processo de concentração, como demonstrado pelo valor de grau de liberação (95,1%). As partículas mistas somam apenas 7% sendo que 6% são de partículas mistas tipo 3.

No caso da AGEO 72, os resultados obtidos no estudo do grau de liberação pelo MLR sugerem que pode haver dificuldades no processo de flotação devido ao baixo grau de liberação da amostra e elevada proporção de partículas mistas, principalmente nas frações mais grosseiras da amostra.

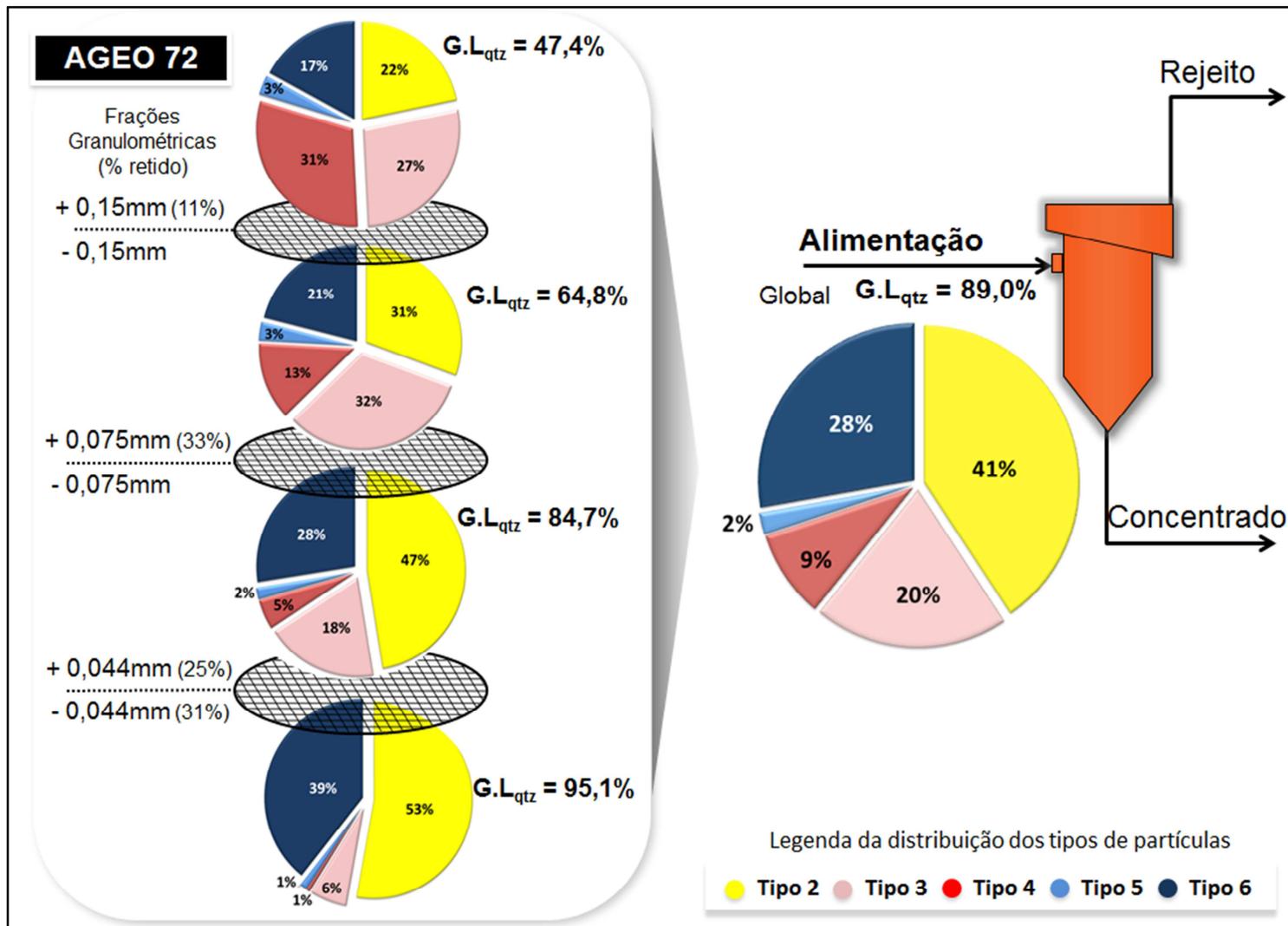


Figura 5.35 - AGEO 72: Gráficos de setores com a distribuição dos tipos de partículas livres e mistas e valores de grau de liberação na alimentação da flotação, alíquota global e nas frações +0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm.

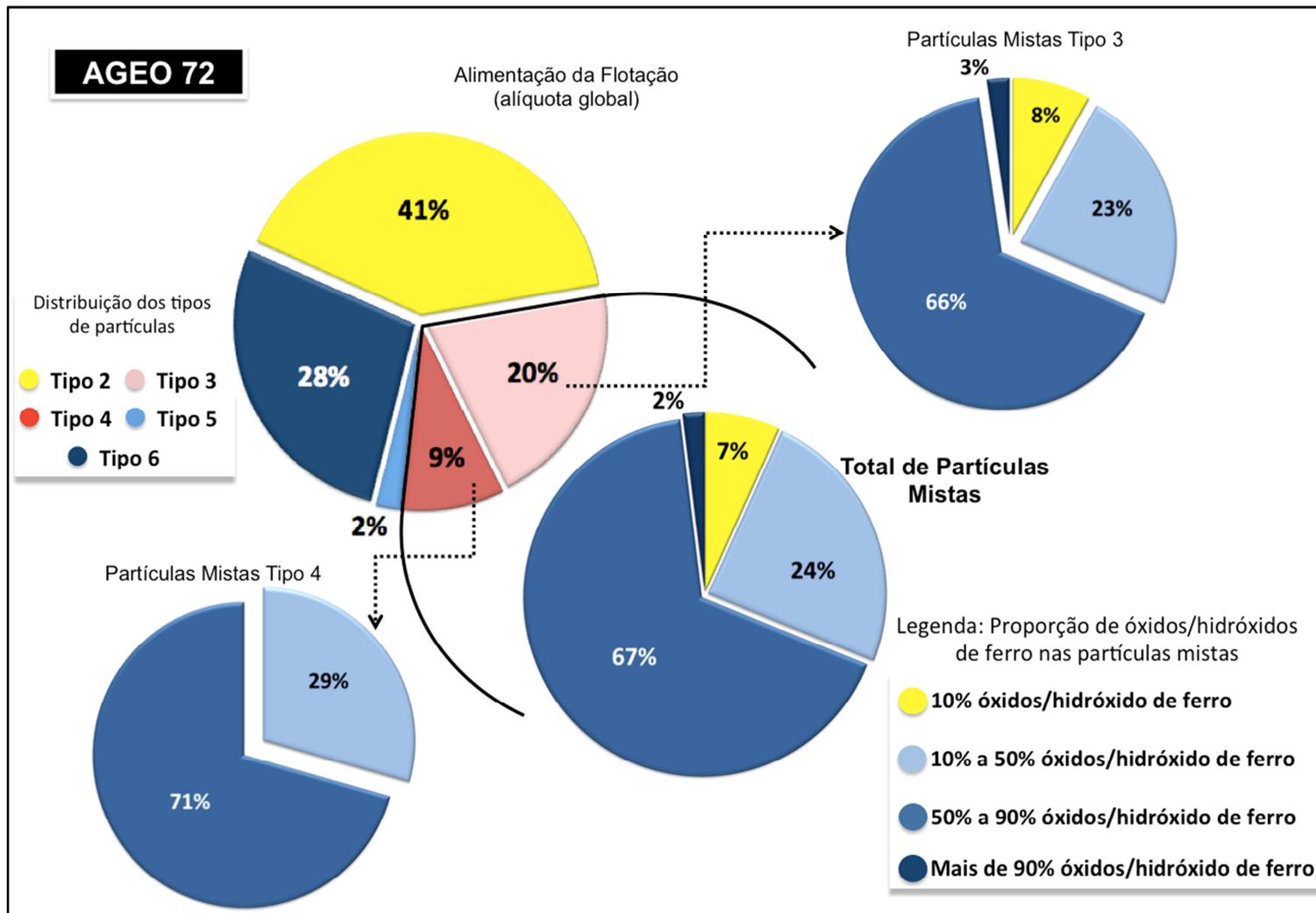


Figura 5.36 - Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas da alimentação da flotação, alíquota global, AGEO 72.

Pelo trabalho de caracterização mineralógica realizado no MLA foi possível construir o gráfico com o espectro de liberação do quartzo com a distribuição acumulada das partículas pela classe de composição do quartzo na partícula. Estão apresentadas no gráfico da figura 5.37 as curvas da AGEO 72 em comparação com a AGEO 88.

Pelo gráfico da figura 5.37 é possível observar que o minério da AGEO 72 apresenta menor liberação de quartzo do que a AGEO 88 visto que somente 73% das partículas são consideradas como liberadas, ou seja, apresentam mais de 90% de quartzo em sua composição, enquanto que na AGEO 88 são 97% das partículas.

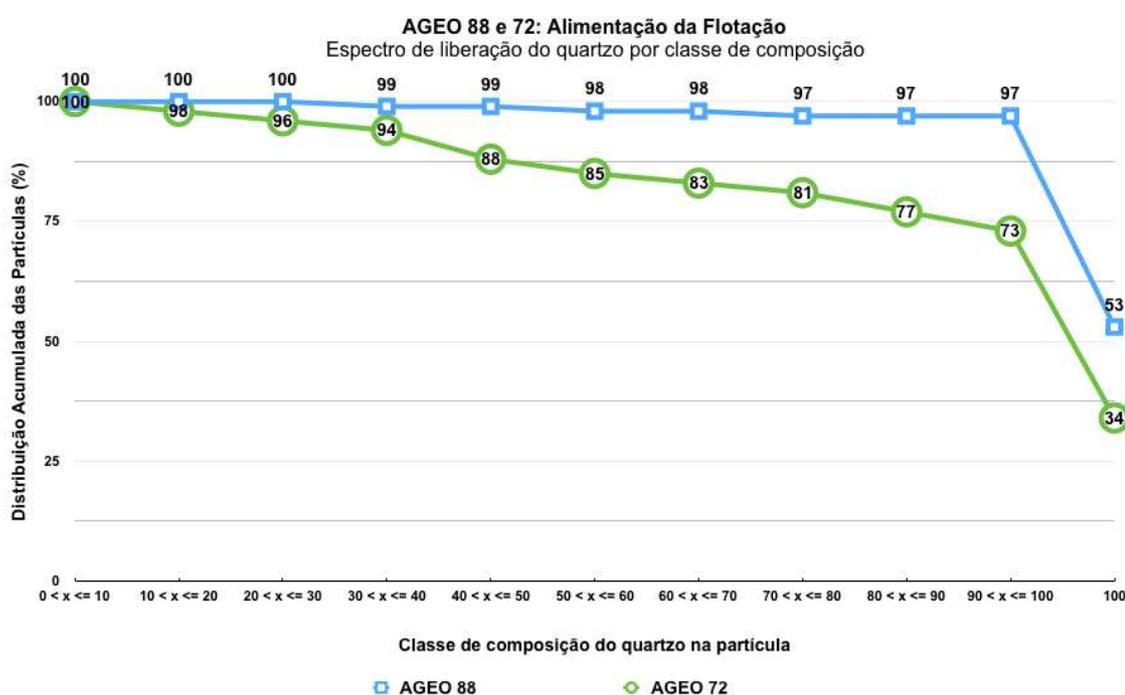


Figura 5.37 – Espectro de liberação do quartzo por classe de composição. AGEO 88 e AGEO 72: Alimentação da flotação, alíquota global.

O gráfico da figura 5.38 exibe as curvas granulométricas das partículas da AGEO 88 e AGEO 72, considerando as partículas mistas e livres. Pelas curvas é possível observar que as partículas constituintes da AGEO 72 são ligeiramente maiores do que da AGEO 88, com 83,6% das partículas passantes em 0,15mm (150µm) e 24,5% das partículas abaixo de 0,044mm (44µm).

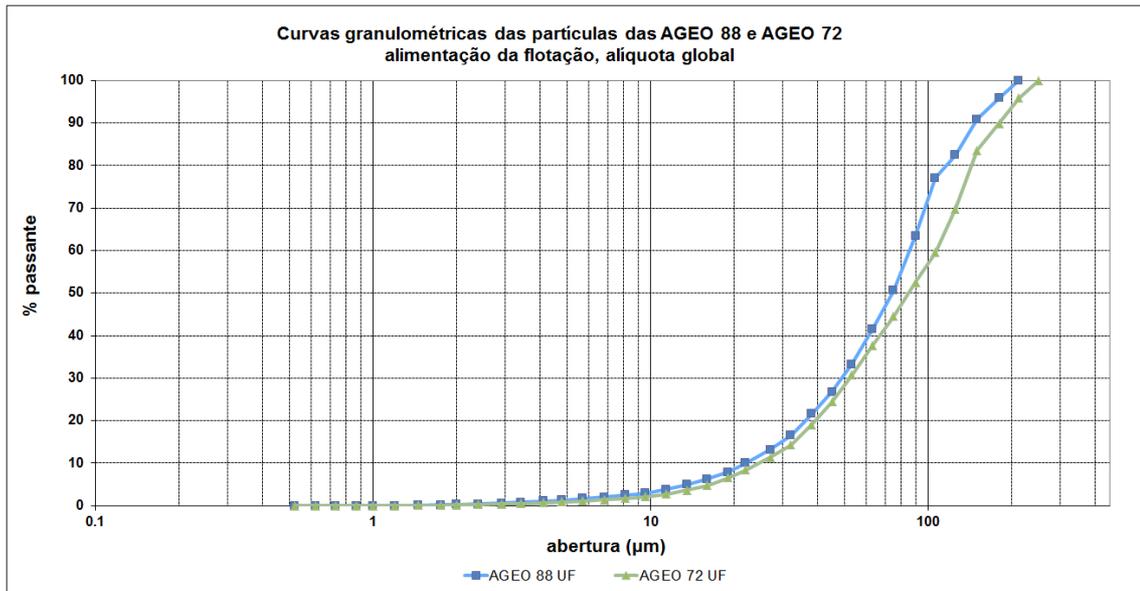


Figura 5.38 – Curva granulométrica das partículas livres e mistas da AGEO 88 e AGEO 72: alimentação da flotação, alíquota global.

Em relação aos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita, as respectivas curvas granulométricas estão apresentadas na figura 5.39. Os grãos de quartzo exibem granulometria mais grossa em todas as frações em comparação com os grãos de hematitas ou magnetita e com a goethita, com 84% dos grãos passante em 0,15mm (150µm) e 32% passante em 0,044mm (44µm). As curvas granulométricas dos grãos de hematitas/magnetita e da goethita são semelhantes e se cruzam em algumas frações. Os grãos de hematitas/magnetita estão em 96% das vezes abaixo de 0,15mm (150µm) enquanto que 91% dos grãos de goethita são passantes nessa granulometria. Na fração 0,044mm (44µm) 41% dos grãos de hematitas/magnetita são passantes, assim como os grãos de goethita.

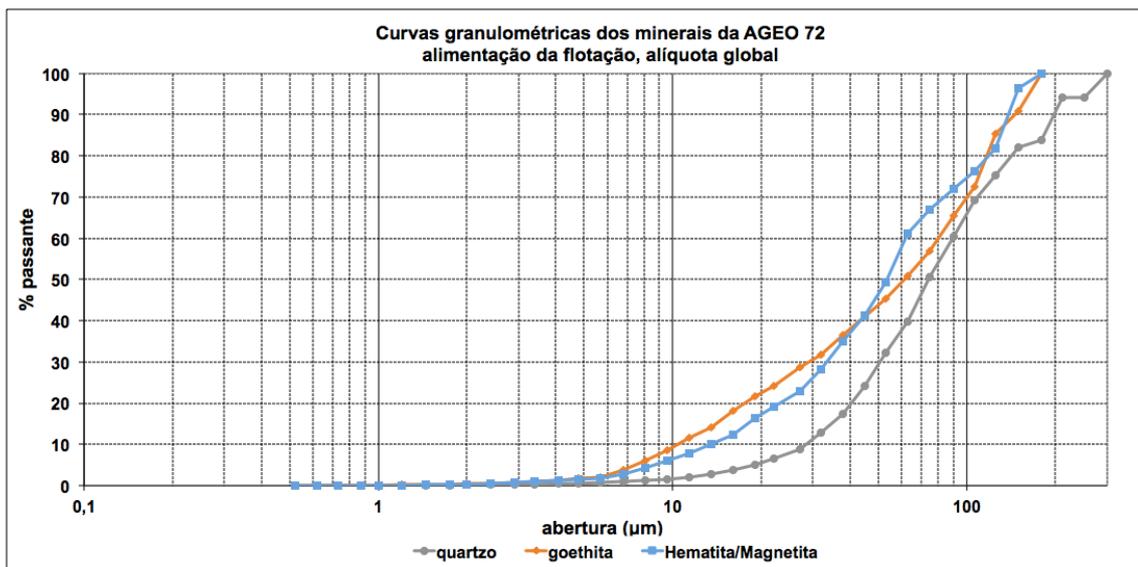


Figura 5.39 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 72, alimentação da flotação, alíquota global.

Na figura 5.40 estão exibidos os gráficos de setores com o resultado das associações mineralógicas, considerando as principais fases mineralógicas constituintes do minério, quartzo, hematitas/magnetita e goethita.

Com relação aos grãos de hematitas/magnetita, 46% apresentam superfície livre, 60% estão associadas a goethita e 4% estão associados ao quartzo. A goethita apresenta 46% de superfície livre, 45% associadas a hematitas ou magnetita e 9% ao quartzo. Analisando as associações mineralógicas do quartzo observa-se que 83% dos grãos apresentam superfície livre, 12% estão associados à goethita e 5% à hematitas ou magnetita.

Comparando os gráficos das associações mineralógicas da AGEO 72 (figura 5.40) com os da AGEO 88 (figura 5.34) é possível observar que na AGEO 72 os grãos de quartzo se encontram menos liberados, com menor proporção de superfície livre, do que a AGEO 88, concordando com os resultados de grau de liberação e com as curvas de espectro de liberação do quartzo (figura 5.37).

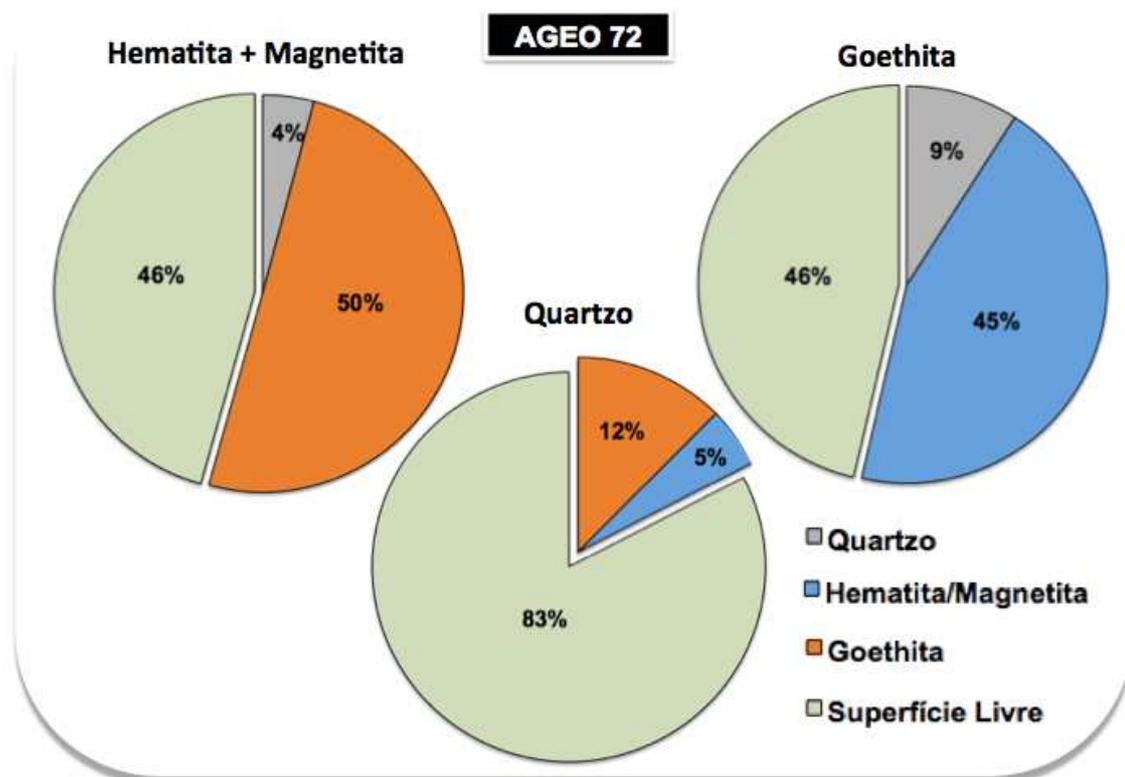


Figura 5.40 – Gráficos com as associações mineralógicas das principais fases constituintes do minério da AGEO 88, alimentação da flotação, alíquota global.

Na figura 5.41 são apresentados os dados de grau de liberação e distribuição dos tipos de partículas livres e mistas para a alimentação da flotação do minério da AGEO 77, segundo caracterização mineralógica no MLR. O grau de liberação da alíquota global é de apenas 78,6%, valor bem mais baixo do que a AGEO 72 (89%). O MLA gerou resultado de 74,1% de grau de liberação (tabela V.12), ligeiramente inferior ao grau de liberação obtido no MLR.

Os valores de grau de liberação obtidos no MLR e no MLA são condizentes com aqueles obtidos no minério após a moagem. O grau de liberação do minério da AGEO 77 moído em 20 minutos foi de apenas 71,5%.

O minério da AGEO 77 apresentou dificuldades no processo de moagem apresentando elevado valor de requerimento energético de moagem (11,3 kWh/t) e, ainda, baixo grau de liberação do quartzo.

Com relação à distribuição dos tipos de partículas, a AGEO 77 exibe proporção bem mais elevada de quartzo livre do que a AGEO 72, igual a 57%, refletindo o baixo teor

de ferro desta amostra na alimentação da flotação (33,9%). A participação de partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro é de apenas 13%, valor bem inferior ao das amostras AGEO 88 e AGEO 72. O total de partículas mistas na alíquota global da alimentação da flotação é de 30% sendo que 23% são de partículas mistas tipo 3 e 7% de partículas mistas complexas tipo 4.

Semelhante à condição apresentada pela AGEO 72, o grau de liberação e a distribuição de partículas mistas e livres da alíquota global da alimentação da flotação da AGEO 77 retratam um cenário consideravelmente desfavorável ao processo de flotação, somado ao teor de ferro muito baixo (33,9%) e conseqüentemente um volume de sílica elevado (49,4%).

E ainda, as partículas mistas, tipo 3 e tipo 4, são constituídas majoritariamente por quartzo, em relação aos minerais de ferro. Na figura 5.42 é possível notar que, do total de partículas mistas, apenas 36% das partículas são constituídas predominantemente de óxidos/hidróxido de ferro (>50%). Grande parte das partículas mistas (58%) apresenta entre 10% e 50% de óxidos/hidróxido de ferro em sua composição e 6% das partículas mistas são compostas principalmente por quartzo (>90%).

Das partículas tipo 3, que correspondem a maioria das partículas mistas (23%), 41% delas são constituídas por mais de 50% de óxidos/hidróxido de ferro, 51% das partículas possuem entre 10% e 50% de óxidos/hidróxido de ferro na composição mineralógica e 8% das partículas mistas são majoritariamente constituídas por quartzo. As partículas mistas complexas tipo 4 são compostas predominantemente por quartzo sendo que 78% das partículas possuem até 50% de óxidos/hidróxido de ferro e apenas 22% das partículas apresentam entre 50% e 90% de óxidos/hidróxido de ferro em sua composição mineralógica.

A distribuição dos tipos de partículas mistas e a respectiva composição mineralógica dessas partículas indicam que as partículas mistas não apresentam uma tendência clara de posicionamento no concentrado, exibindo uma condição com caráter mais aleatório de posicionamento, podendo posicionar-se no concentrado ou seguir para o rejeito.

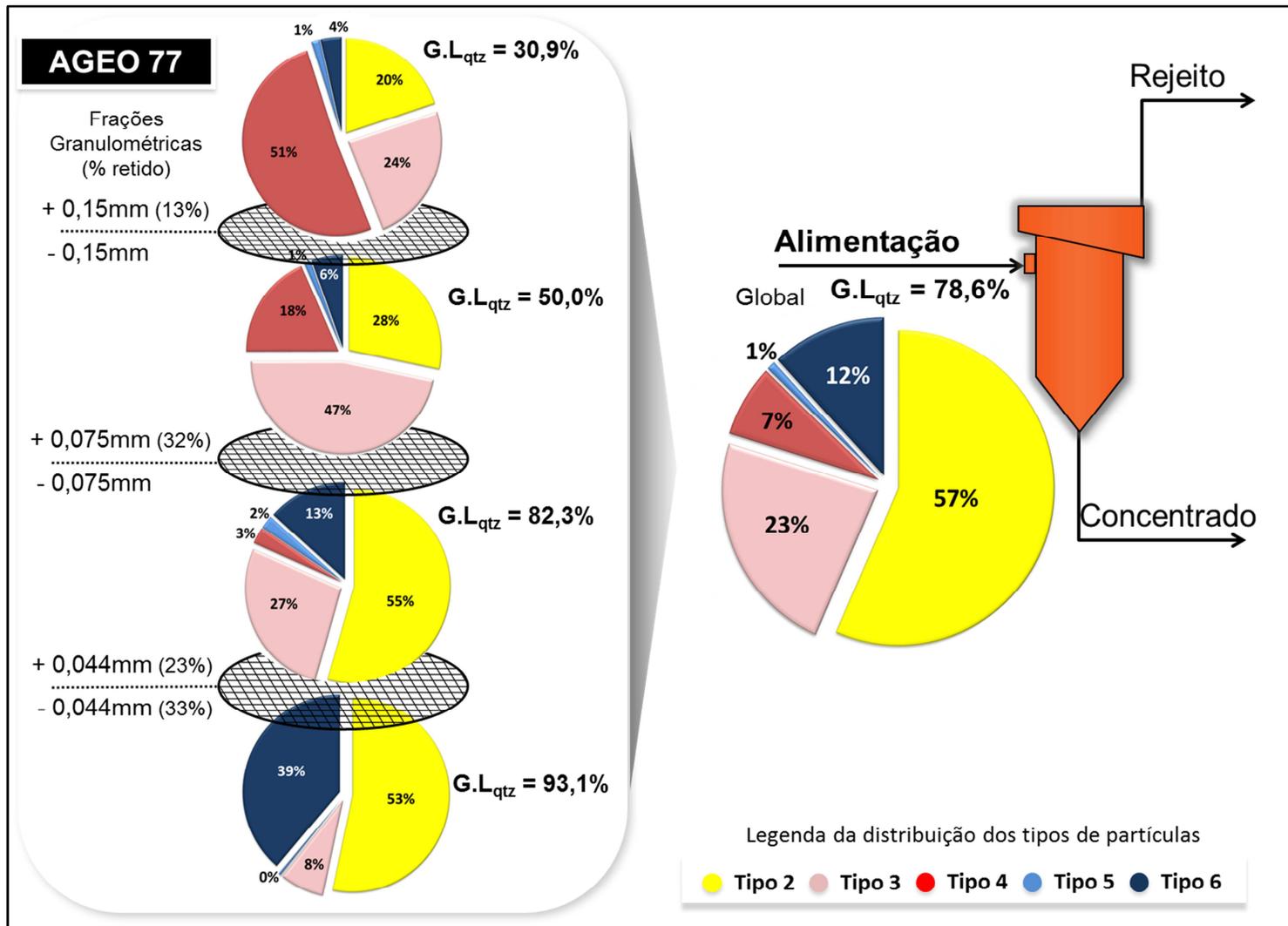


Figura 5.41 - AGEO 77: Gráficos de setores com a distribuição dos tipos de partículas livres e mistas e valores de grau de liberação na alimentação da flotação, alíquota global e nas frações +0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm.

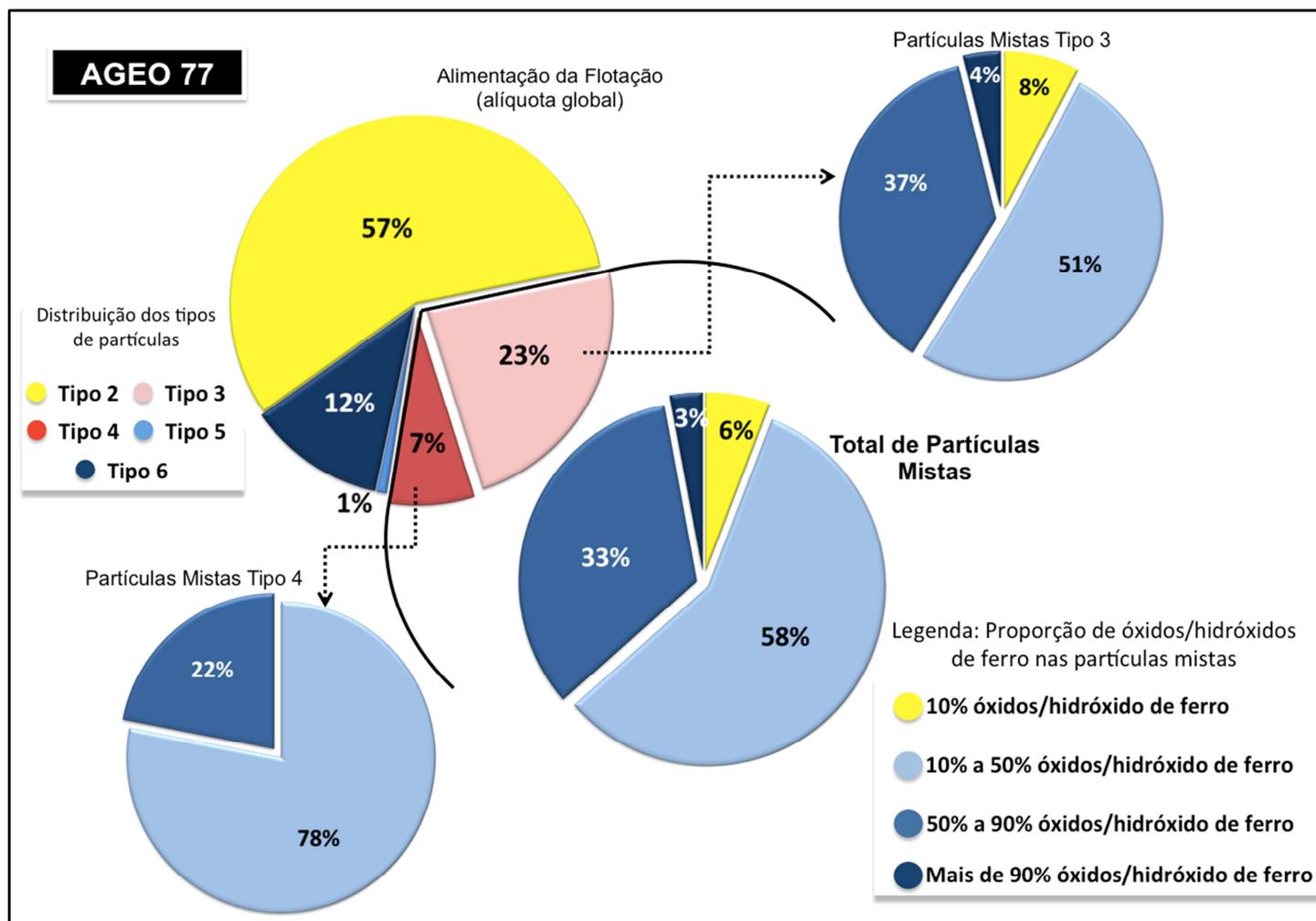


Figura 5.42 - Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas da alimentação da flotação, alíquota global, AGEO 77.

Detalhando o estudo do grau de liberação por faixas granulométricas (figura 5.41) é notável que somente na fração mais fina da amostra (-0,044mm), que corresponde a 33% da amostra total, que a condição se mostra um pouco mais favorável ao processo de flotação.

Na fração mais grosseira da amostra, +0,15mm, o grau de liberação do quartzo é de apenas 30,9%, demonstrando que, se a moagem não alcançar a especificação granulométrica necessária, de 10% retido em 0,15mm, a liberação mineral estará em condição totalmente desfavorável ao processo de concentração. A distribuição dos tipos de partículas refletem este cenário, em que, somente 20% das partículas correspondem a partículas de quartzo livres e apenas 5% são de partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro. Em contrapartida, 75% das partículas são partículas mistas, sendo que 51% são partículas mistas complexas tipo 4 e 24% de partículas mistas tipo 3.

Na fração -0,15mm +0,075mm a proporção de partículas liberadas é razoavelmente superior à fração mais grosseira, com 28% de partículas livres de quartzo e 7% de partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro. As partículas mistas ainda são majoritárias sendo que as partículas mistas tipo 3 é predominante, com 47% das partículas, enquanto que as partículas mistas tipo 4 correspondem a 18%. O grau de liberação nesta fração é de 50%.

Na fração -0,075mm +0,044mm já ocorre grande mudança na condição de liberação do quartzo e na distribuição dos tipos de partículas em comparação às frações mais grossa, com grau de liberação de 82,3%. As partículas liberadas de quartzo são predominantes e correspondem a 55% e as liberadas de óxidos/hidróxido de ferro somam 15%. As partículas mistas se concentram nas partículas mistas tipo 3, com 27%, e as partículas tipo 4 equivale a 3% do total.

Na porção mais fina da amostra, -0,044mm, o grau de liberação é de 93,1%, revelando um estado mais favorável ao processo de flotação nesta fração. A proporção de partículas liberadas de quartzo são de 53% e as partículas de óxidos/hidróxido de ferro livres somam 39%. As partículas mistas tipo 4 já não estão presentes e as partículas mistas tipo 3 correspondem a 8%.

Assim como na AGEO 72, o minério da AGEO 77 só apresenta condições ótimas para o processo de flotação na faixa granulométrica passante em 0,044mm, indicando que,

a malha granulométrica em que a moagem primária da Samarco atua, em 0,15mm, não é suficiente para adequar este tipo de minério para o processo de flotação.

Com relação aos resultados obtidos no trabalho de caracterização no MLA, primeiramente, observa-se pela curva do espectro de liberação do quartzo (figura 5.43), que realmente a condição de liberação do quartzo para a AGEO 77 é consideravelmente inadequado quando comparado às amostras AGEO 88 e AGEO 72. No caso da AGEO 77, apenas metade das partículas (49%) que compõe a amostra apresentam mais de 90% de quartzo em sua composição, enquanto que na AGEO 88 são 97% das partículas e na AGEO 72 são 73%.

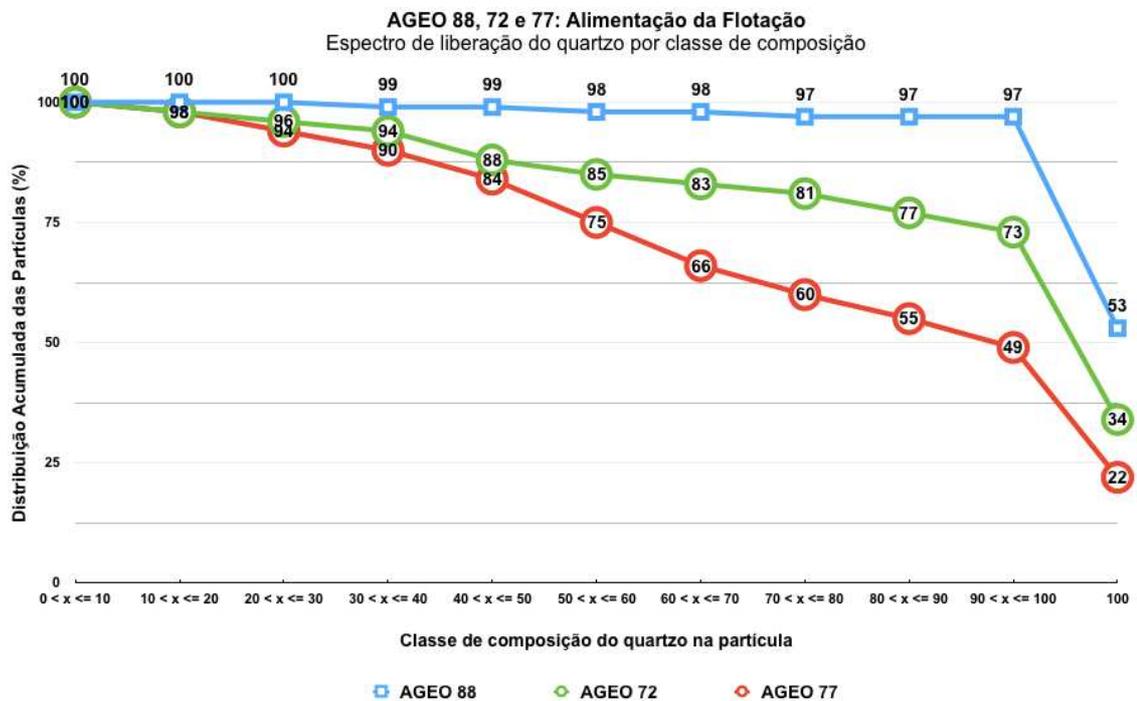


Figura 5.43 – Espectro de liberação do quartzo por classe de composição. AGEO 88, AGEO 72 e AGEO 77: Alimentação da flotação, alíquota global.

No gráfico da figura 5.44 encontram-se as curvas granulométricas das partículas (mistas e livres) da AGEO 88, AGEO 72 e AGEO 77. Pelas curvas é possível observar que as partículas da AGEO 77 são ligeiramente mais finas do que da AGEO 72, mesmo o ROM da AGEO 77 tendo granulometria mais grossa e sendo mais resistente ao processo de cominuição do que o minério da AGEO 72. Do total de partículas,

86,8% são passantes em 0,15mm (150 μ m) e 24,8% das partículas estão abaixo da fração 0,044mm (44 μ m).

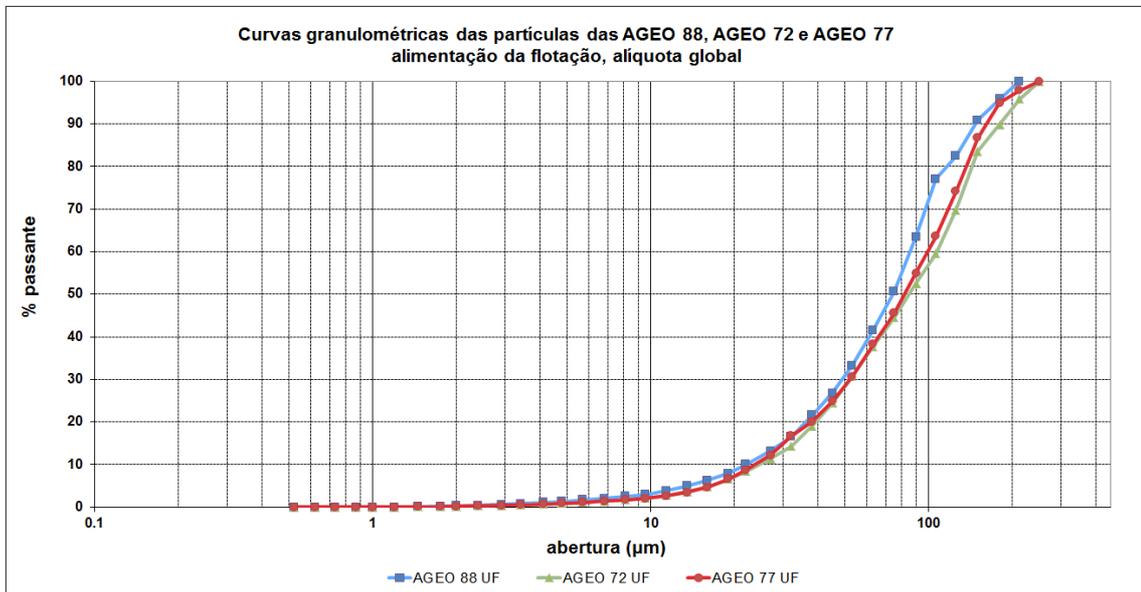


Figura 5.44 – Curva granulométrica das partículas livres e mistas da AGEO 88, AGEO 72 e AGEO 77: alimentação da flotação, alíquota global.

As curvas granulométricas dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita, estão exibidas na figura 5.45. Assim como nas demais amostras estudadas, AGEO 88 e AGEO 72, os grãos de quartzo são mais grossos em praticamente todas as frações, em comparação com os grãos de hematitas ou magnetita e com a goethita, com 93% dos grãos passante em 0,15mm (150 μ m) e 38% passante em 0,044mm (44 μ m).

Diferentemente do que acontece com as amostras até agora descritas, as curvas granulométricas dos grãos da AGEO 77 mostram que os grãos de hematitas ou magnetita são maiores em todas as frações do que os grãos de goethita. Do total de grãos de hematitas ou magnetita 96% são passantes na malha de 0,15mm (150 μ m) enquanto que o total de grãos de goethita (100%) estão abaixo dessa faixa granulométrica. Na fração 0,044mm (44 μ m) 49% dos grãos de hematitas ou magnetita e 65% dos grãos de goethita são passantes.

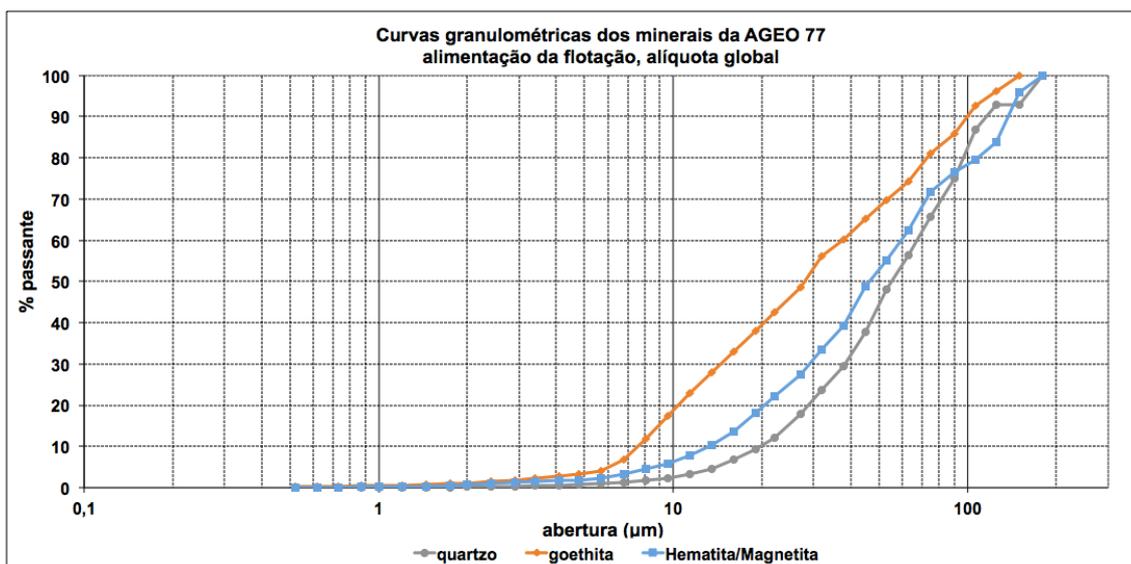


Figura 5.45 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 77, alimentação da flotação, alíquota global.

Com relação as associações mineralógicas da AGEO 77, o cenário é muito distinto daqueles apresentados pelos minérios da AGEO 88 e AGEO 72. Os gráficos de setores da figura 5.46 mostram que, os grãos de hematitas ou magnetita apresentam apenas 36% de superfície livre, 53% dos grãos estão associados a goethita e 11% aos grãos de quartzo. Com relação à goethita, 32% apresentam superfície livre, 48% estão associadas às hematitas ou magnetita e 20% estão associadas aos quartzo.

Analisando as associações mineralógicas do quartzo, fica evidenciado o baixo valor de grau de liberação deste minério. Do total de grãos de quartzo, apenas 68% apresentam superfície livre, 10% estão associados à hematita ou magnetita e 22% associados à goethita.

A goethita, dependendo do processo de gênese do minério, pode apresentar um caráter de cimentação formando um agregado de grãos com diversas fases. Conforme descrito na caracterização mineralógica, as goethitas sempre ocorrem neste minério compondo as partículas mistas complexas tipo 4, formando um agregado de grãos com o quartzo e/ou hematita martítica, com contatos imbricados entre eles, com junções tríplexes, em contato poligonal ou até mesmo interlobado. Além desses fatores, soma-se o fato de que os grãos de goethita da AGEO 77 são bem mais finos do que dos minérios da AGEO 88 e 72 (figura 5.47), remetendo a uma malha mais fina para a liberação entre as fases, principalmente goethita e quartzo.

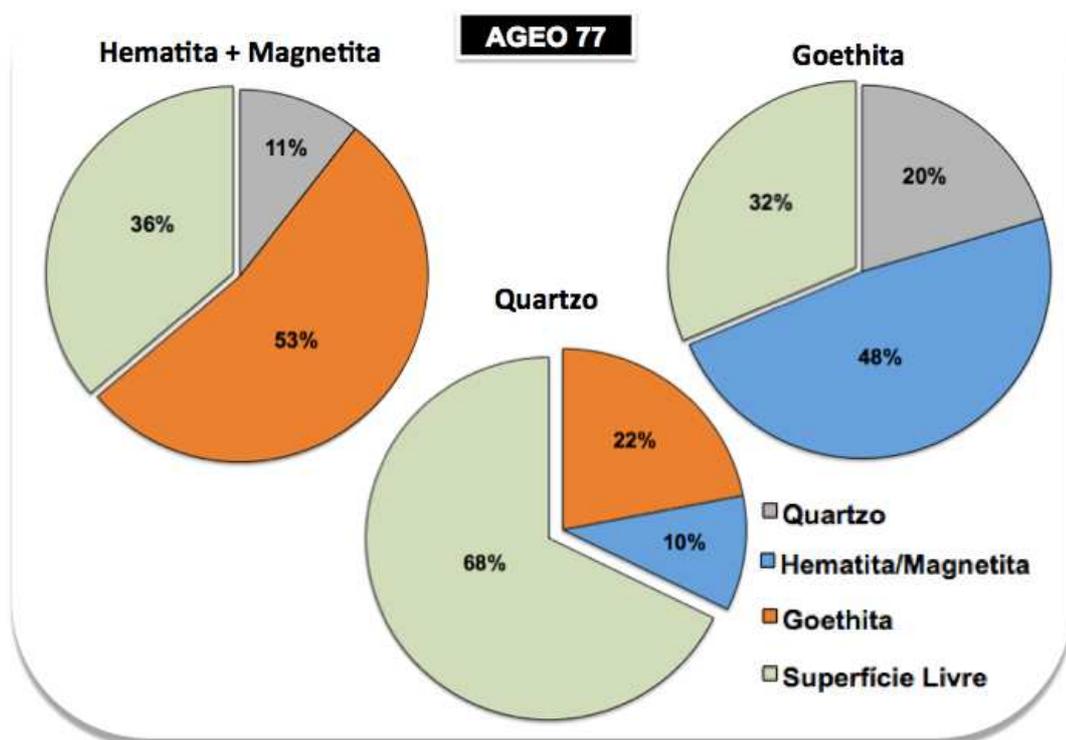


Figura 5.46 – Gráficos com as associações mineralógicas das principais fases constituintes do minério da AGEO 77, alimentação da flotação, alíquota global.

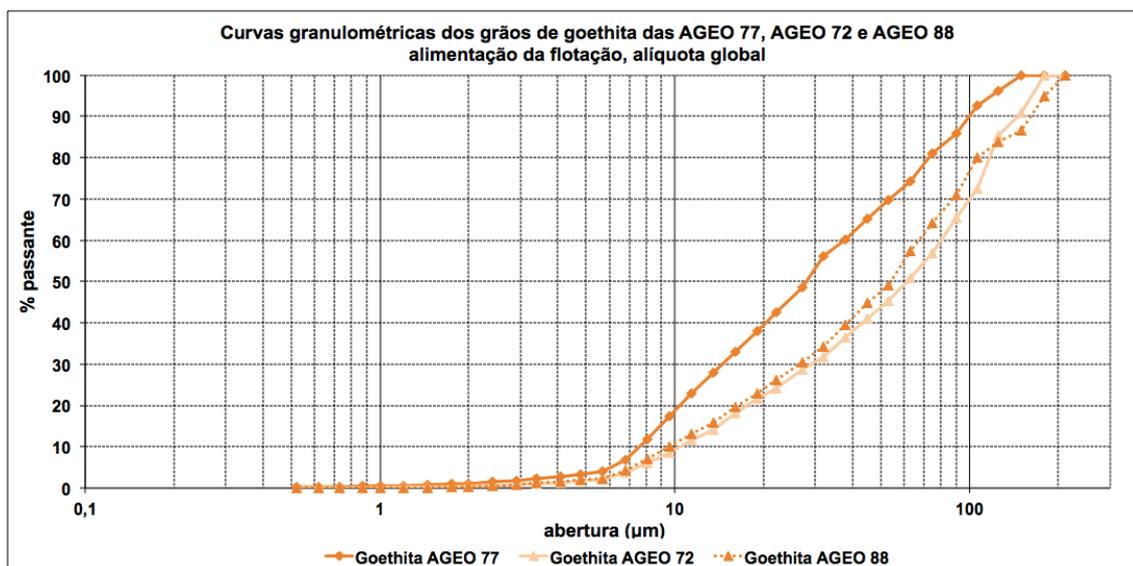


Figura 5.47 – Curva granulométrica dos grãos de goethita das AGEO 77, AGEO 72 e AGEO 88: alimentação da flotação, alíquota global.

O grau de liberação do quartzo do minério da AGEO 91 é o mais alto dentre as amostras estudadas, na alimentação da flotação, alíquota global. De acordo com os

estudos no MLR o valor do grau de liberação do quartzo é de 92,4% (tabela V.12), e conforme caracterização no MLA o valor do grau de liberação do quartzo é de 93,7% (tabela V.12).

Com relação à distribuição dos tipos de partículas mistas (figura 5.48), o minério da AGEO 91 apresenta, aparentemente, a melhor condição para o processo de flotação, pois 90% das partículas estão liberadas e há apenas 10% de partículas mistas. As partículas liberadas de quartzo correspondem a 43% e as partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro a 47%. As partículas mistas tipo 3 equivalem a 9% e as partículas mistas complexas tipo 4 chegam a 1% do total de partículas.

Apesar do minério da AGEO 88 ter sido escolhida como referencia para comparação com as demais amostras, o minério da AGEO 91 apresenta condições mais favoráveis ao processo de concentração, no que diz respeito ao grau de liberação.

Detalhando o estudo do grau de liberação pelo MLR por faixa granulométrica é possível constatar que, já na fração -0,15mm +0,075mm, as condições de liberação já são consideradas ótimas.

Antes, na fração +0,15mm, que corresponde a 10% da amostra, o grau de liberação do quartzo é igual a 86,6. Com relação à distribuição dos tipos de partículas, 46% das partículas correspondem a partículas liberadas de quartzo e 31% a partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro. As partículas mistas somam 23%, sendo que 16% equivalem às partículas mistas tipo 3 e outros 7% a partículas mistas complexas tipo 4.

Na faixa -0,15mm +0,075mm o grau de liberação já é de 92,8% com 53% das partículas de quartzo liberadas e 35% das partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro. As partículas mistas somam 12%, sendo 8% de partículas mistas tipo 3 e 4% de partículas mistas tipo 4.

Na fração granulométrica -0,075mm +0,044mm as partículas mistas são quase irrelevantes, totalizando 5%. As partículas liberadas somam 95% do total de partículas, com 47% de partículas liberadas de quartzo e 48% de partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro. O grau de liberação é igual a 96,7%.

Na fração mais fina da amostra, a proporção de partículas liberadas de óxidos e hidróxido é predominante, correspondendo a 63%. As partículas liberadas de quartzo é igual a 36% e as partículas mistas inexistem.

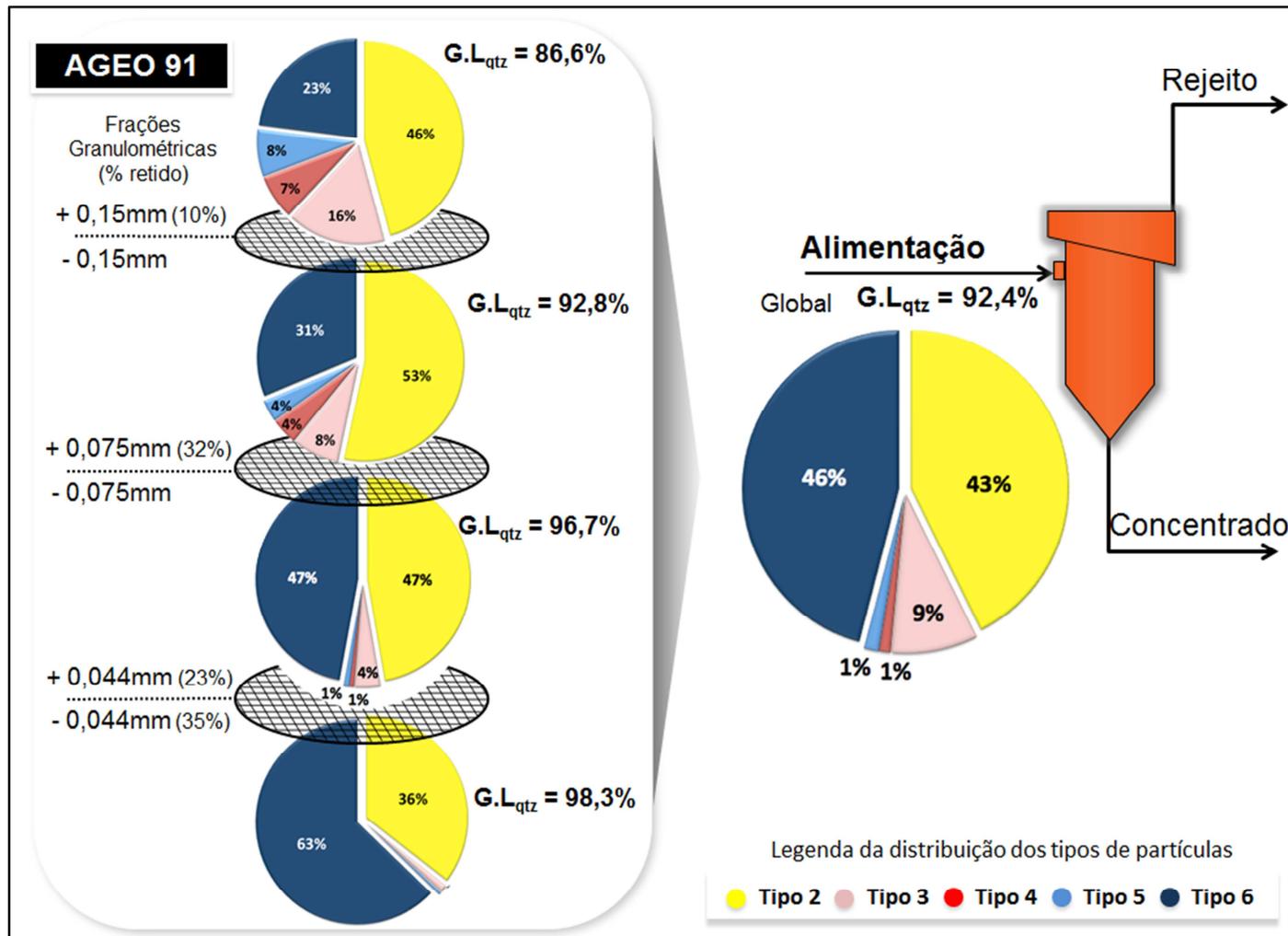


Figura 5.48 - AGEO 91: Gráficos de setores com a distribuição dos tipos de partículas livres e mistas e valores de grau de liberação na alimentação da flotação, alíquota global e nas frações +0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm.

Pelos dados obtidos na caracterização mineralógica realizada no MLA foi construída a curva do espectro de liberação do quartzo para a amostra AGEO 91, apresentada na figura 5.49, juntamente com as curvas das amostras AGEO 88, AGEO 72 e AGEO 77. Corroborando com os dados obtidos no MLR, os dados de liberação entre as amostras AGEO 91 e AGEO 88 são igualmente excelentes. A curva do espectro de liberação do quartzo para a AGEO 91 praticamente sobrepõe a curva da AGEO 88, com 97% das partículas constituídas por mais de 90% de quartzo.

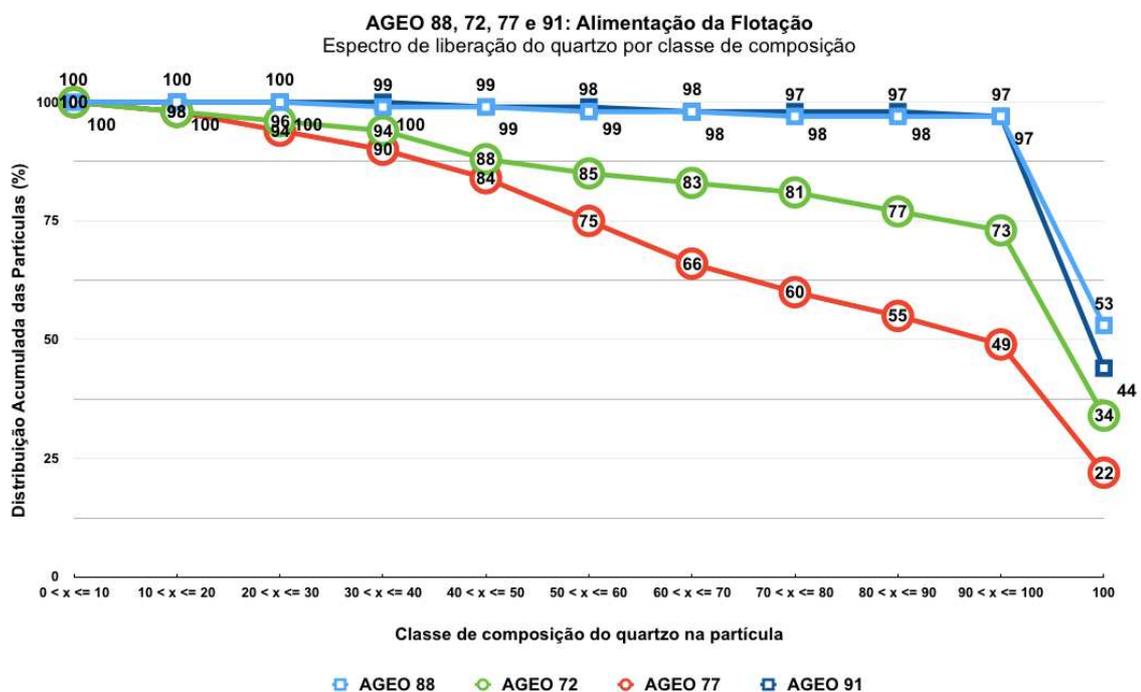


Figura 5.49 – Espectro de liberação do quartzo por classe de composição. AGEO 88, AGEO 72, AGEO 77 e AGEO 91: Alimentação da flotação, alíquota global.

As partículas que compõem o minério da AGEO 91 são tão finas quanto as partículas que compõem a AGEO 88, conforme gráfico da figura 5.50 com a distribuição granulométrica das partículas livres e mistas das AGEO 88, AGEO 72, AGEO 77 e AGEO 91. Do total de partículas, 77,8% estão abaixo de 0,15mm (150µm) e 27,8% passantes em 0,044mm (44µm).

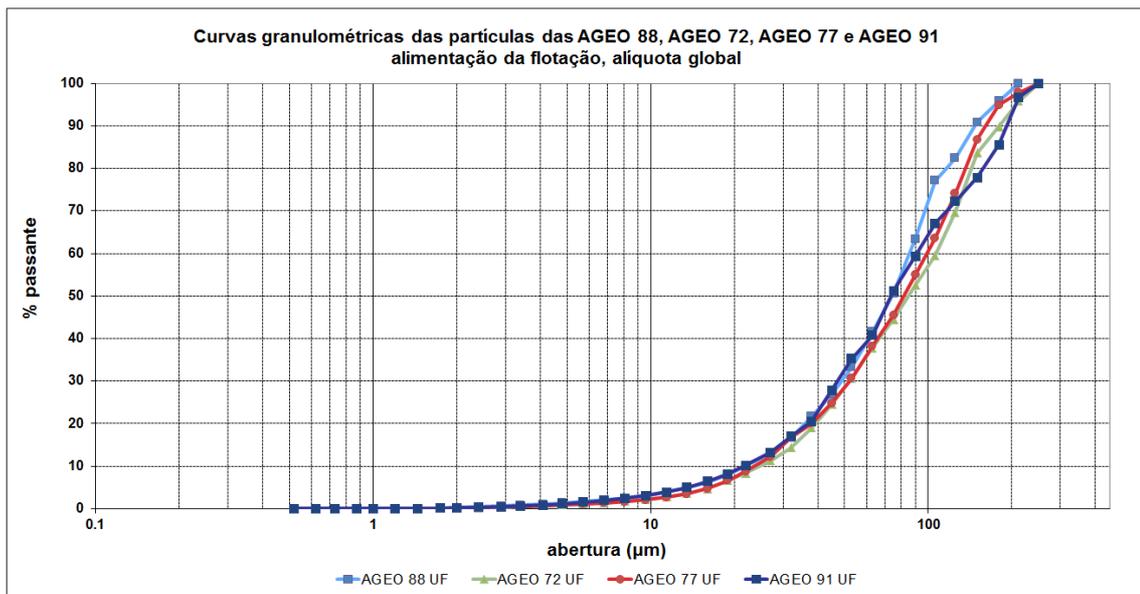


Figura 5.50 – Curva granulométrica das partículas livres e mistas da AGEO 88, AGEO 72, AGEO 77 e AGEO 91: alimentação da flotação, alíquota global.

Analisando a distribuição granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas ou magnetita e goethita, apresentadas na figura 5.51, é possível notar que os grãos de goethita apresentam granulometria mais fina nas menores frações, com 55,3% abaixo de 0,044mm (44μm), enquanto que os grãos de hematita ou magnetita apresentam 41,8% passante nesta faixa e os de quartzo apresentam 14,2%. Nas frações maiores, os grãos de hematita ou magnetita apresentam 81,7% dos grãos passante em 0,15mm (150μm), enquanto que os grãos de goethita apresentam 77,4% passante e os de quartzo 83,2%.

Com relação as associações mineralógicas, o minério da AGEO 91 apresenta condições que justificam o alto valor de grau de liberação. As hematitas ou magnetitas apresentam superfície livre em 68% das partículas e os outros 31% estão associados às goethitas. Já os grãos de goethitas apresentam 55% de superfície livre e 44% estão associados a grãos de hematitas ou magnetitas. O quartzo apresenta 98% de superfície livre, estando associados às hematitas ou magnetitas ou goethitas em apenas 2% das partículas (figura 5.52).

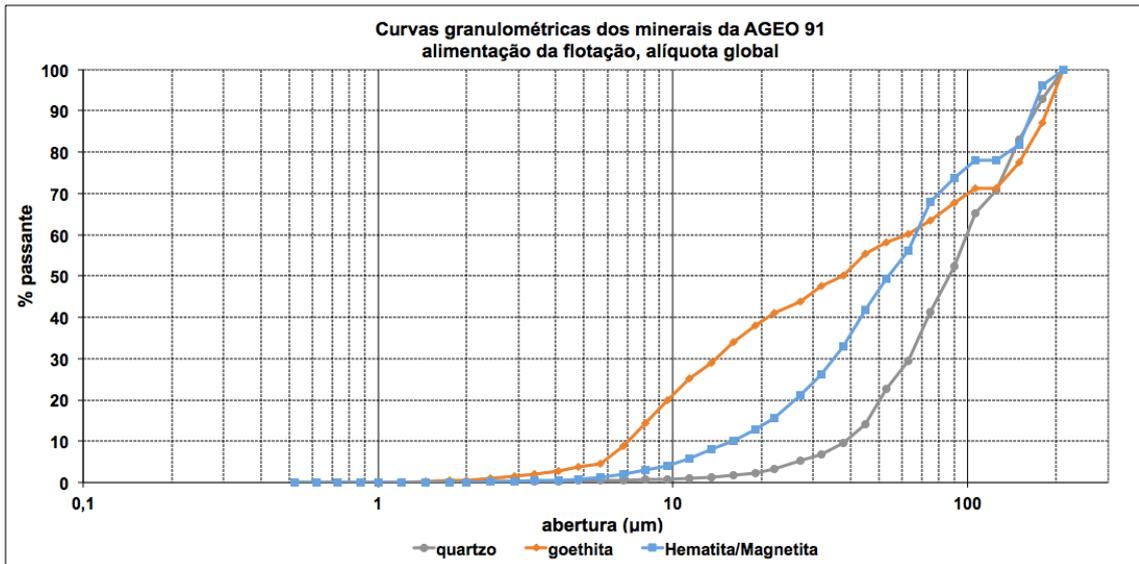


Figura 5.51 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 91, alimentação da flotação, alíquota global.

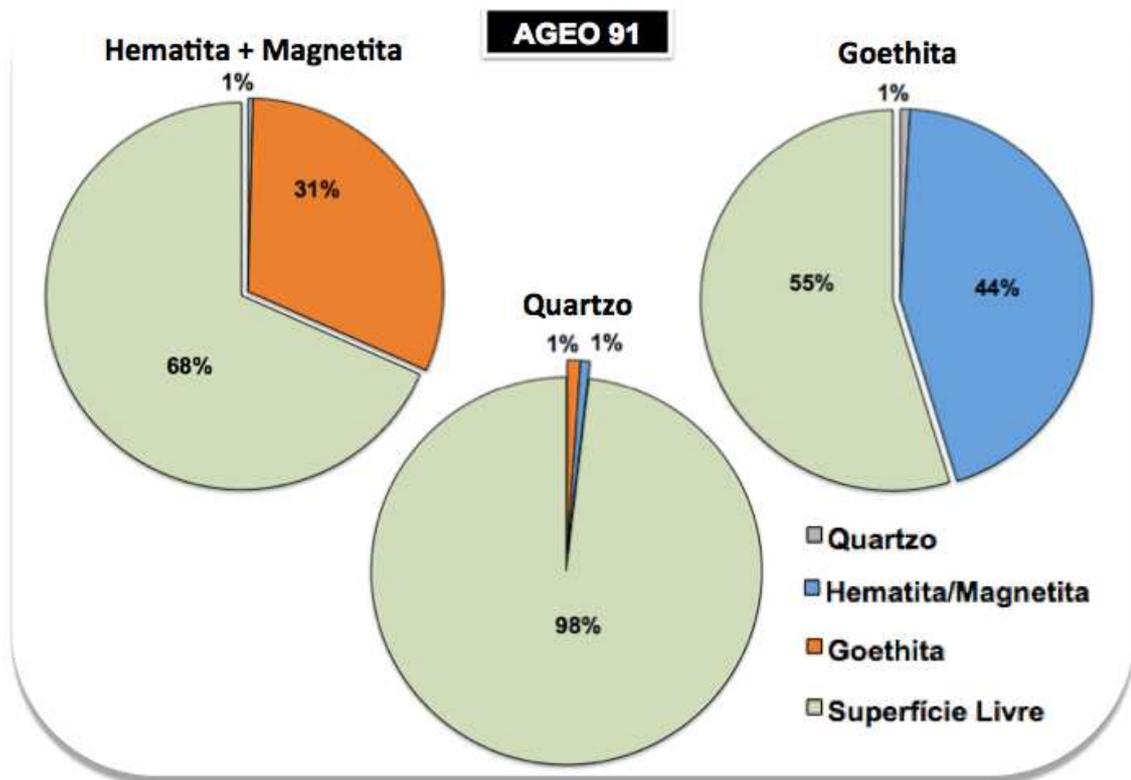


Figura 5.52 – Gráficos com as associações mineralógicas das principais fases constituintes do minério da AGEO 91, alimentação da flotação, alíquota global.

O minério da AGEO 107 apresentou na alíquota global da alimentação da flotação 88,6% de grau de liberação do quartzo (figura 5.53 e tabela V.12), valor na mesma ordem de grandeza das AGEO 72 e levemente superior à AGEO 77. Com relação à distribuição de partículas, ressalta-se a maior proporção de partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro, somando 35%, quando comparadas com as AGEO 72 e relativamente superior ao da AGEO 77. No MLA o grau de liberação obtido foi de 90,4% (tabela V.12), valor levemente superior ao valor no MLR e mesmo valor da AGEO 72.

Pelo gráfico de distribuição dos tipos de partículas, na alíquota global, é notável que o minério da AGEO 107 é o que apresenta maior proporção de partículas mistas tipos 3 e 4 dentre todas as amostras estudadas, somando 32%. Do total de partículas mistas 27% correspondem a partículas mistas tipo 3 e outros 5% a partículas mistas complexas tipo 4. A participação das partículas livres de quartzo equivale a 33% (figura 5.53).

O minério da AGEO 107, apesar de apresentar diferente constituição mineralógica dos minérios das amostras AGEO 72 e AGEO 77, também exibe condições desfavoráveis para o processo de concentração, apesar de ligeiramente distintas.

Detalhando a composição mineralógica das partículas mistas, considerando a proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas, observa-se que, 56% das partículas mistas são compostas predominantemente por óxidos/hidróxido de ferro (>50%), 32% das partículas são constituídas entre 10% e 50% de óxidos/hidróxido e que 12% das partículas constituem-se de mais de 90% de quartzo (figura 5.54). Nas partículas mistas tipo 3 são 54% compostas predominantemente por óxidos/hidróxido de ferro e os outros 46% das partículas apresentam menos de 50% de óxidos/hidróxido de ferro em sua composição. Das partículas mistas complexas tipo 4, 56% apresentam mais de 50% de óxidos/hidróxido de ferro em sua composição, 30% das partículas possuem menos de 50% de óxidos/hidróxido de ferro e 14% das partículas são compostas majoritariamente por quartzo.

A composição mineralógica das partículas mistas revela que praticamente metade das partículas são compostas majoritariamente por óxidos/hidróxido de ferro e a outra parte composta predominantemente por quartzo. Desta forma, entende-se que poderá haver posicionamento de partículas mistas no concentrado e no rejeito, prejudicando a qualidade do concentrado e os índices de recuperação em peso e metálica.

Quando se detalha o estudo para as frações granulométricas é mais claro a diferença do grau de liberação e da distribuição dos tipos de partículas mistas e livres entre as amostras. No caso da AGEO 107, na fração +0,15mm o grau de liberação é de 58,7% com 32% de partículas de quartzo livres e 14% de partículas de óxidos/hidróxido de ferro liberadas. As partículas mistas são predominantes nesta fração, totalizando 54%, sendo que 33% são de partículas mistas tipo 3 e outros 21% de partículas mistas complexas tipo 4.

Na fração -0,15mm +0,075mm as partículas mistas correspondem a 25% do total de partículas, valor bem inferior ao apresentado na fração mais grosseira da amostra. As partículas liberadas de quartzo correspondem a 50% e as liberadas de óxidos/hidróxido de ferro a 25%. O grau de liberação nesta fração é de 81,6%.

A proporção de partículas mistas na fração -0,075mm +0,044mm é de 16%, sendo que 15% corresponde às partículas mistas tipo 3. As partículas de óxidos/hidróxido de ferro liberadas somam 46% enquanto que as partículas livres de quartzo equivalem a 38%. O grau de liberação é de 84,9%.

Na fração mais fina da amostra (-0,044mm) o grau de liberação é igual a 94,4%. Destaca-se a proporção de partículas livres de óxidos/hidróxido de ferro que somam 62% do total de partículas. As partículas livres de quartzo correspondem a 34% enquanto que as partículas mistas tipo 3 equivalem a 4%.

Da mesma forma do que ocorre nas amostras AGEO 72 e AGEO 77, o espectro de liberação da AGEO 107 é mais favorável somente na fração mais fina da amostra (-0,044mm), porém, a vantagem é que a distribuição dos tipos de partículas e o próprio valor do grau de liberação apresenta-se favorável ao processo de flotação já na fração -0,15mm.

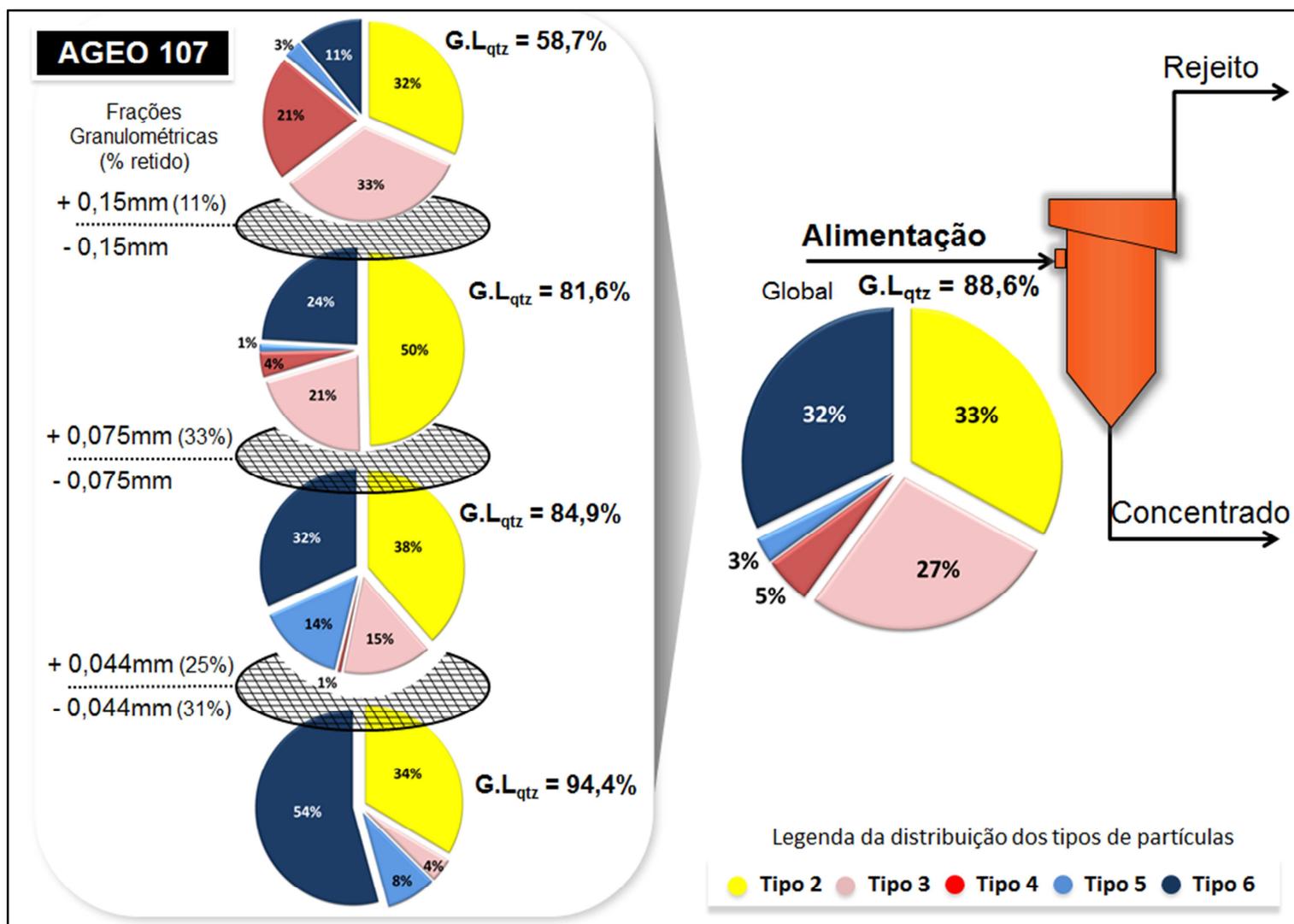


Figura 5.53 - AGEO 107: Gráficos de setores com a distribuição dos tipos de partículas livres e mistas e valores de grau de liberação na alimentação da flotação, alíquota global e nas frações +0,15mm, -0,15mm +0,075mm, -0,075mm +0,044mm e -0,044mm.

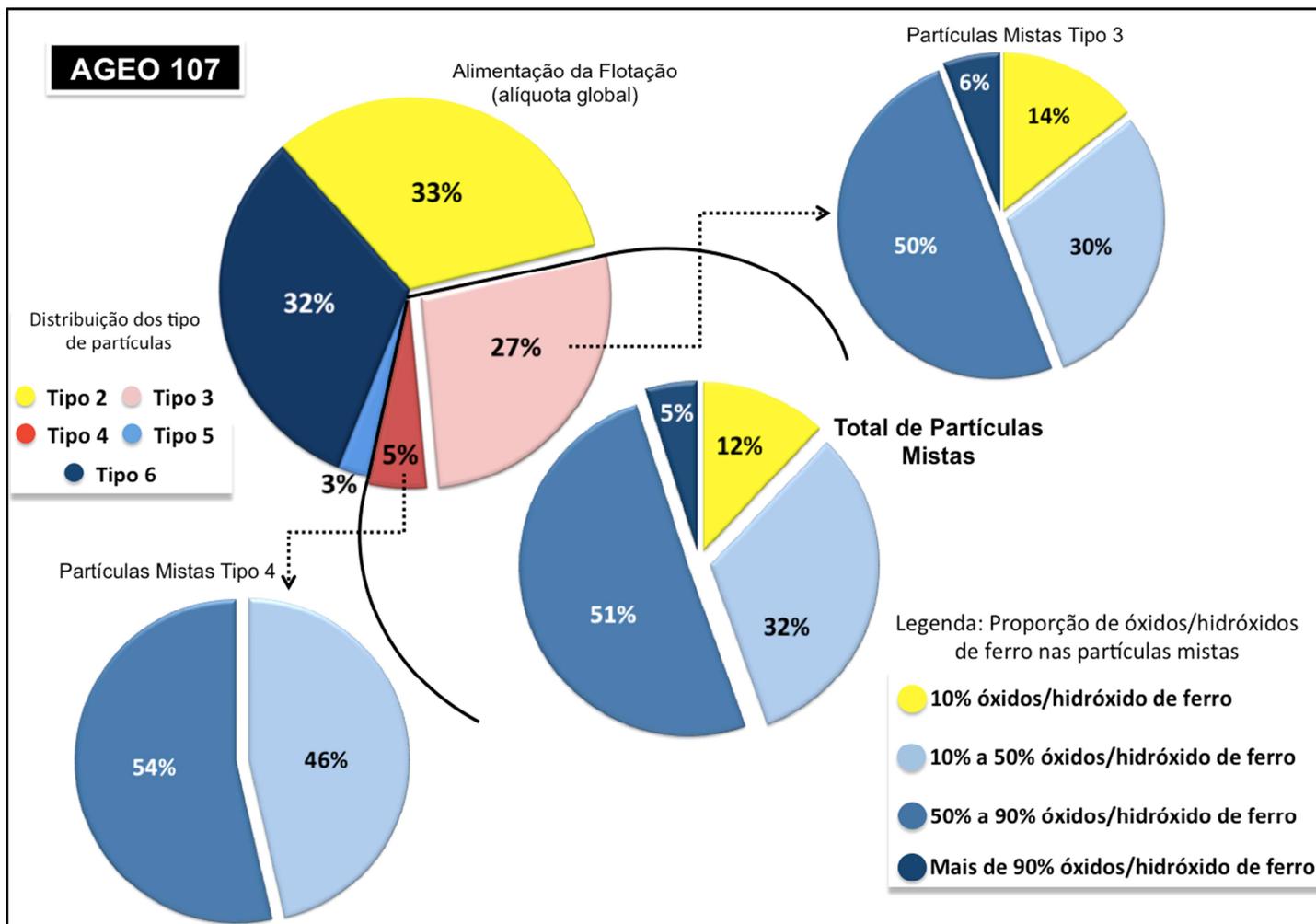


Figura 5.54 - Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas da alimentação da flotação, alíquota global, AGEO 107.

A curva do espectro de liberação do quartzo da AGEO 107 (figura 5.55), gerada a partir dos dados obtidos no MLA, mostra que a condição de liberação do quartzo é similar ao minério da AGEO 72, onde 68% das partículas apresentam mais de 90% de quartzo na composição mineralógica.

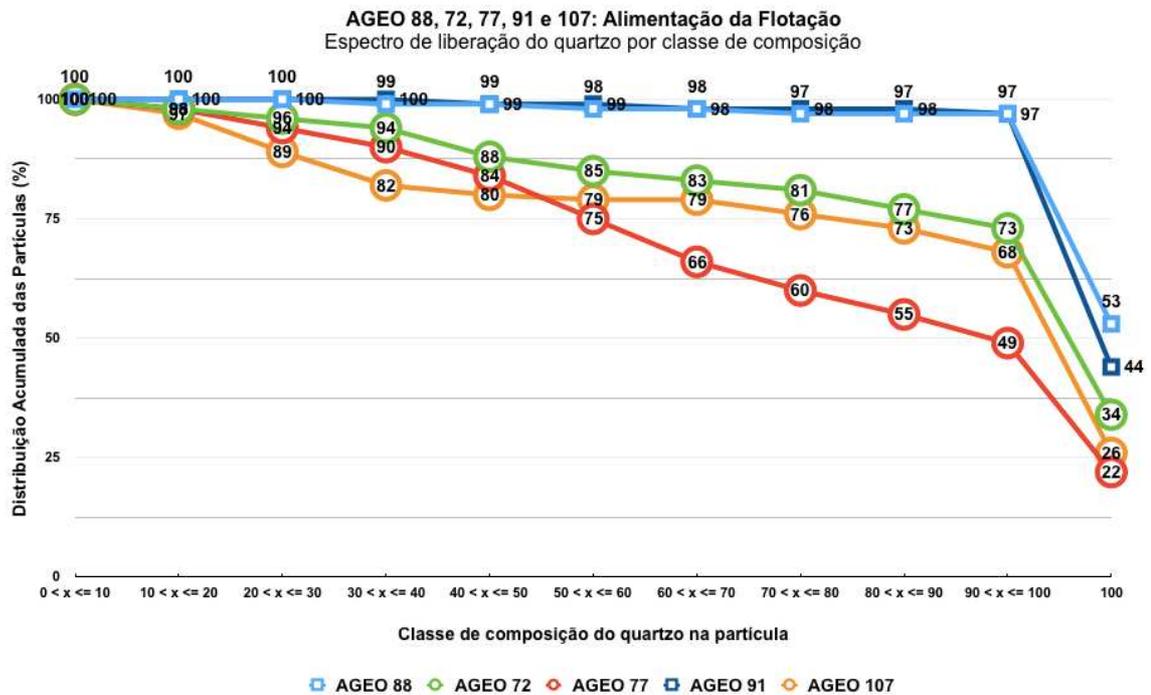


Figura 5.55– Espectro de liberação do quartzo por classe de composição. AGEO 88, AGEO 72, AGEO 77, AGEO 91 e AGEO 107: Alimentação da flotação, alíquota global.

A distribuição granulométrica das partículas da AGEO 107 está apresentada na figura 5.56, junto com curvas das demais amostras. As partículas que compõem o minério da AGEO 107 são as mais grosseiras dentre as amostras estudadas, mesmo o minério (ROM) não sendo o mais grosso ou o mais resistente ao processo de cominuição (requerimento energético da moagem de 5,5 kWh/t). Do total de partículas, 68,9% são passantes em 0,15mm (150µm) e 20,9% passante na fração 0,044mm (44µm).

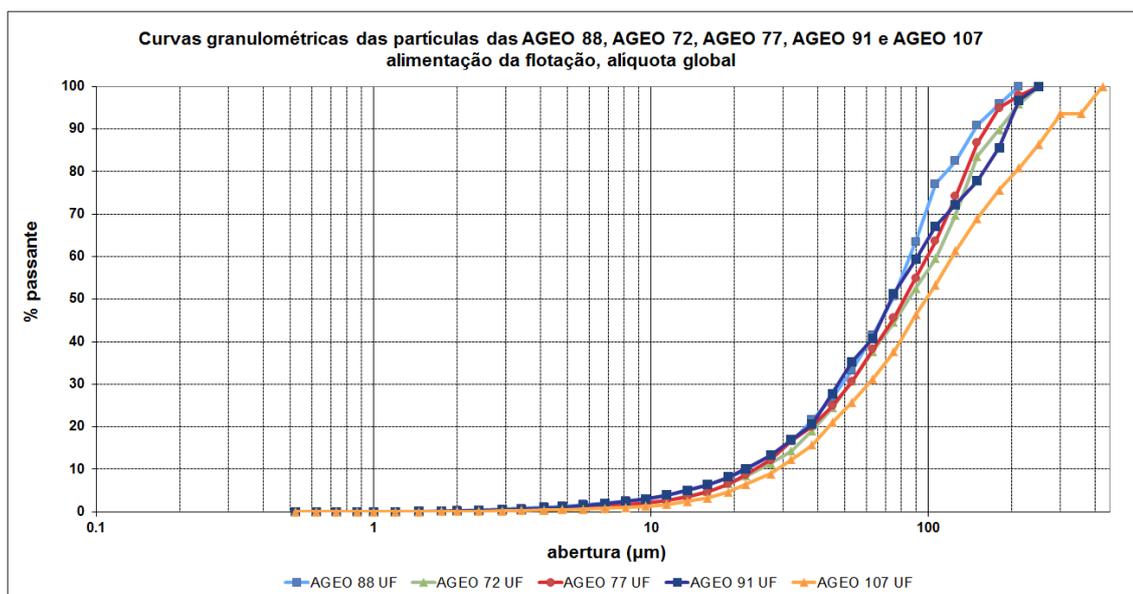


Figura 5.56 – Curva granulométrica das partículas livres e mistas da AGEO 88, AGEO 72, AGEO 77, AGEO 91 e AGEO 107: alimentação da flotação, alíquota global.

Com relação à distribuição granulométrica dos grãos de hematita ou magnetita, goethita e quartzo, é possível observar pela curva da figura 5.57 que a goethita compõe os grãos mais finos da amostra, com 100% dos grãos passante em 0,15mm (150µm) e 61,7% abaixo da fração 0,044mm (44µm).

Os grãos de hematita ou magnetita se apresentam mais finos do que o quartzo em praticamente todas as faixas analisadas, com 83,5% abaixo da fração de 0,15mm (150µm) e 37,7% abaixo da fração 0,044mm (44µm). Os grãos de quartzo apresentam granulometria mais grossa dentre as amostras estudadas, com 94,8% passante em 0,15mm (150µm) e 21,5% abaixo da fração 0,044mm (44µm).

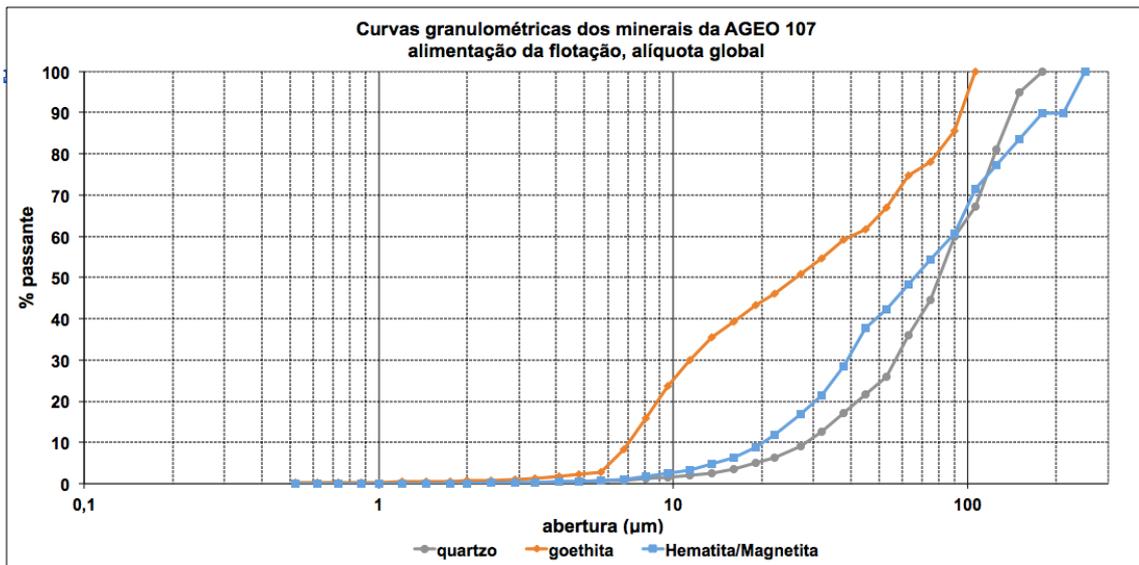


Figura 5.57 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 107, alimentação da flotação, alíquota global.

As associações mineralógicas da AGEO 107 se assemelha razoavelmente à condição apresentada pela AGEO 72. Conforme exibido na figura 5.58, 49% dos grãos de hematita e magnetita apresentam superfície livre, 41% estão associados à goethita e 10% associados ao quartzo. Os grãos de goethita apresentam somente 29% das partículas com superfície livre, 56% dos grãos estão associados à hematita ou magnetita e 15% associados ao quartzo. Os grãos de quartzo se apresentam em apenas 71% com superfície livre, estando associados à hematita ou magnetita em 14% dos casos e associados à goethita em 15%.

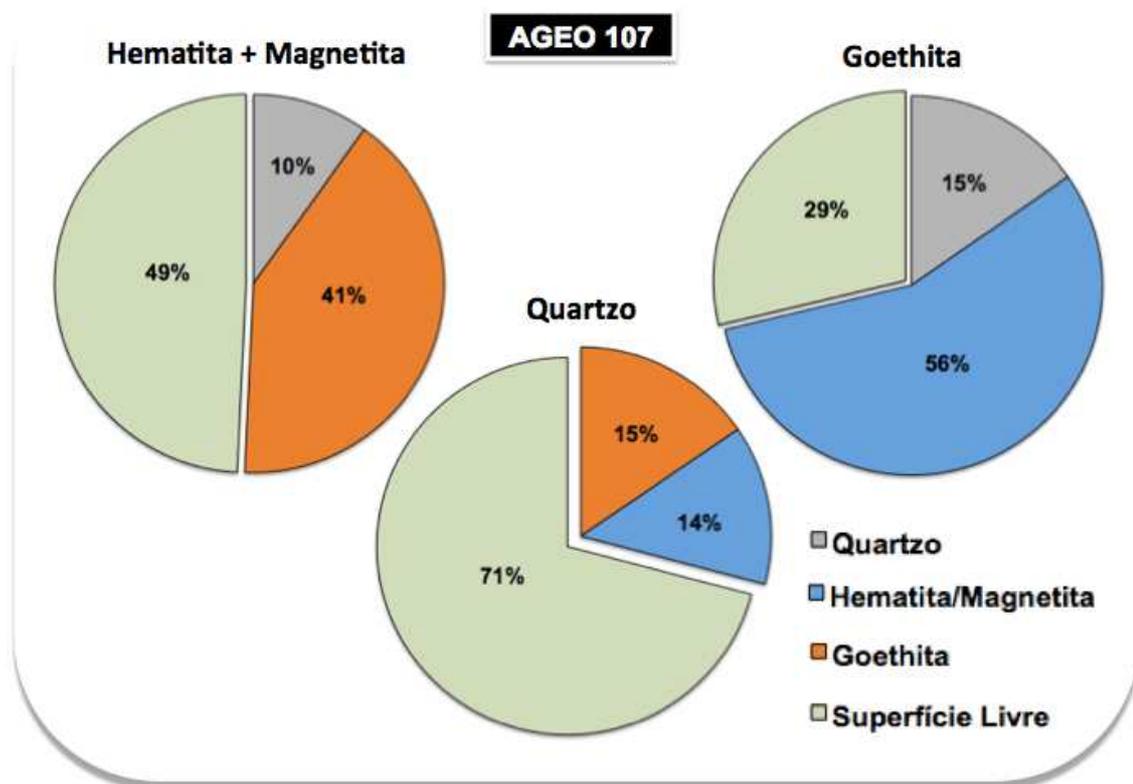


Figura 5.58 – Gráficos com as associações mineralógicas das principais fases constituintes do minério da AGEO 107: alimentação da flotação, alíquota global.

5.7 Flotação

Cada amostra estudada foi submetida ao ensaio de flotação em bancada para obtenção de um concentrado de minério de ferro. O desempenho do minério na etapa de flotação foi avaliado pela qualidade química do concentrado obtido, segundo teor de SiO₂, e pelos valores das recuperações metálica e índice de seletividade.

Neste capítulo são apresentados os resultados do ensaio de flotação por meio dos valores de recuperação em massa e recuperação metálica e pela qualidade química do concentrado obtido, sendo também discutidas as informações relacionadas ao posicionamento dos tipos de partículas mistas e livres no concentrado ou rejeito, à distribuição granulométrica das partículas e dos grãos de quartzo, goethita e hematita/magnetita, e às associações mineralógicas no concentrado e no rejeito.

Na tabela V.13 estão apresentados os valores da recuperação em massa (recuperação em peso ou recuperação mássica) e recuperação metálica para a etapa de flotação de cada uma das amostras. Para efeito de comparação, estão apresentados também na tabela V.13 os valores médios de recuperação em massa e metálica dos testes de flotação em bancada efetuados em todas amostras AGEO, caracterizadas em 2015 para atender aos planos geometalúrgicos. São amostras coletadas em frentes de lavra totalizando 120 amostras.

Tabela V.13 – Resultados das recuperações mássica e metálica na etapa da flotação em bancada.

	Recuperação em Peso (%)	Recuperação Metálica (%)
AGEO 72	39,5	65,6
AGEO 77	26,2	44,6
AGEO 88	61,8	89,6
AGEO 91	54,8	74,6
AGEO 107	26,0	43,7
Valores Médios AGEO (2015)	59,0	79,6

A AGEO 88 apresentou recuperação em peso igual a 61,8% e recuperação metálica de 89,6%, os melhores resultados dentre as amostras estudadas. Em comparação à média das recuperações em massa (59,0%) e metálica (79,6%) das amostras caracterizadas em 2015, o minério da AGEO 88 obteve resultados superiores, principalmente na recuperação metálica.

Em contrapartida, o minério da AGEO 107 apresentou os piores índices de recuperação mássica e metálica, com valores respectivos de 26,0% e 43,7%. A amostra AGEO 77 apresentou resultados semelhantes aos da AGEO 107, com recuperação em peso de 26,2% e metálica de 44,6%. Esses são valores muito aquém

daqueles obtidos em ensaios em bancadas com as amostras caracterizadas em 2015, com valores médios de recuperação em peso de 59% e metálica de 79,6%.

A AGEO 72 apresentou bom valor de recuperação metálica (65,6%) mas um baixo valor de recuperação em peso (39,5%), demonstrando que é um tipo de minério com bom desempenho para recuperação de ferro porém apresenta dificuldades na produção.

A AGEO 91 apresentou valores satisfatórios e bem próximos aos valores médios das amostras caracterizadas em 2015, com recuperação em peso igual a 54,8% e recuperação metálica de 74,6%.

A qualidade química do concentrado (tabela V.14) traduz o desempenho de cada tipo de minério na etapa de flotação a partir do teor de SiO₂. Na tabela V.15 são apresentados os resultados da qualidade química do rejeito onde ressalta-se o teor de ferro, que deve ser o menor possível.

Tabela V.14 – Composição química das alíquotas de concentrado das amostras estudadas.

Composição Química (%)							
Concentrado							
	Fe	SiO₂	Al₂O₃	P	MnO₂	PPC	FeO
AGEO 72	63,8	3,71	0,26	0,077	0,03	5,25	0,87
AGEO 77	57,7	14,0	0,06	0,021	0,03	3,17	2,41
AGEO 88	67,0	0,79	0,15	0,027	0,10	4,24	1,30
AGEO 91	55,4	18,2	0,53	0,011	0,10	1,18	3,20
AGEO 107	66,8	3,35	0,19	0,059	0,10	1,72	0,70

Primeiramente destaca-se o desempenho extraordinário do minério da AGEO 88 na etapa de flotação, com excelente teor de SiO₂ no concentrado, valor de apenas 0,79%. Aliado ao elevado valor de recuperação metálica, a qualidade química do concentrado confirma toda a expectativa na amostra da AGEO 88, refletindo os resultados

discutidos no capítulo anterior referente ao estudo do grau de liberação na alimentação da flotação. Os resultados obtidos corroboram a interpretação de que este tipo de minério apresenta condições totalmente adequadas para a etapa de flotação.

Como consequência do baixíssimo teor de SiO_2 , o teor de ferro do concentrado alcança um valor de 67%. O teor de P (0,027%) apresenta um leve aumento com relação ao teor da alimentação da flotação (0,018%) enquanto que o teor de PPC apresenta um enriquecimento relevante, com teor de 4,24% no concentrado contra 2,53% na alimentação da flotação. O teor de Al_2O_3 é igual a 0,15%.

Para os minérios da AGEO 72 e AGEO 107, que apresentaram condições gerais desfavoráveis ao processo de flotação, apontadas no estudo do grau de liberação na alimentação da flotação, foram obtidos teores próximos de SiO_2 , respectivamente 3,71% e 3,35%, bem próximos a um limite superior de referência de 4% para ensaios de flotação em bancada adotado internamente na Samarco (Rocha, 2008).

O teor de ferro do concentrado da AGEO 72 foi levemente inferior ao da AGEO 107, com teores respectivos de 63,8% e 66,8%. No concentrado da AGEO 72 os teores de Al_2O_3 , P e PPC tiveram enriquecimento com relação aos teores da alimentação da flotação, com valores de 0,26%, 0,077% e 5,25%. Destaque para os teores de P e PPC como sendo os maiores dentre as amostras estudadas. Com relação à AGEO 107, os teores de Al_2O_3 , P e PPC também apresentaram leve aumento em comparação à alimentação da flotação com teores iguais a 0,19%, 0,059% e 1,72%.

O minério da AGEO 77, um tipo de minério muito blocoso, que se mostrou extremamente resistente ao processo de moagem com elevado valor de requerimento energético de moagem (11,3 kWh/t), dentre as amostras estudadas obteve os piores resultados de grau de liberação, cenário mais desfavorável quanto à distribuição de partículas mistas e livres, espectro de liberação do quarto e associações mineralógicas na alimentação da flotação, fez jus às expectativas e apresentou teor de SiO_2 de 14%, totalmente fora dos limites aceitáveis.

O concentrado obtido da AGEO 77 é muito pobre, com teor de ferro de apenas 57,7%. Os teores de Al_2O_3 e P são baixos, respectivamente 0,06% e 0,021%. O teor de PPC no concentrado é considerado baixo por ser um minério classificado como anfíbolítico-martítico, 3,17%.

Surpreendente foi o desempenho do minério da AGEO 91 na etapa de flotação. Com teor de SiO_2 no concentrado de 18,2% e teor de ferro de apenas 55,4%, foi o minério

com pior desempenho, frustrando qualquer expectativa que havia sobre a performance deste minério na flotação.

Por ser um minério que apresentou excelentes resultados na caracterização mineralógica, com grau de liberação do quartzo de praticamente 100% na alimentação da flotação e com a distribuição dos tipos de partículas em condições totalmente favoráveis ao processo de concentração, imaginava-se que esta amostra se portaria de maneira similar à AGEO 88, com obtenção de um concentrado de qualidades nobres.

Com relação às demais variáveis, o minério da AGEO 91 apresentou elevado teor de Al_2O_3 no concentrado (0,53%), baixo teores de P e PPC, com valores respectivos de 0,011% e 1,18%.

Na tabela V.15 estão exibidos a qualidade química dos rejeitos obtidos no processo de flotação em bancada. Corroborando os excelentes valores das recuperações em massa e metálica da AGEO 88 na flotação, o teor de ferro no rejeito foi o mais baixo dentre as amostras estudadas, com valor de 14,2%. Em contrapartida, o elevado teor de ferro do rejeito da AGEO 107 (30%), o mais alto dentre as amostras estudadas, traduz os baixos valores de recuperação em massa e metálica desta amostra.

Tabela V.15 – Composição química das alíquotas de rejeito das amostras estudadas.

Composição Química (%)							
Rejeito							
	Fe	SiO₂	Al₂O₃	P	MnO₂	PPC	FeO
AGEO 72	20,6	68,2	0,10	0,030	0,011	2,09	0,65
AGEO 77	25,1	62,2	0,028	0,014	0,01	1,76	1,1
AGEO 88	14,2	79,0	0,06	0,012	0,01	0,55	0,6
AGEO 91	24,3	63,8	0,57	0,012	0,01	0,67	1,36
AGEO 107	30,0	56,4	0,05	0,019	0,010	0,53	0,52

As amostras AGEO 72 e AGEO 77 também apresentaram elevado teor de ferro no rejeito, com valores de 20,6% e 25,1%, respectivamente.

O teor de ferro no rejeito de 24,3% da AGEO 91 confirma o fraco desempenho do minério na etapa de flotação.

Uma forma eficiente de avaliar o desempenho do minério na etapa de flotação é pelo índice de seletividade (IS) de Gaudin, que leva em consideração o teor de ferro e sílica do concentrado e teor de ferro de sílica do rejeito, dado pela expressão:

$$IS = \sqrt{\frac{Fe \text{ conc.} \times SiO_2 \text{ rej.}}{SiO_2 \text{ conc.} \times Fe \text{ rej.}}} \quad (5.1)$$

Fe conc. = teor de ferro no concentrado;

SiO₂ rej. = teor de sílica no rejeito;

SiO₂ conc. = teor de sílica do concentrado;

Fe rej. = teor de ferro do rejeito.

Na tabela V.16 são apresentados os resultados do índice de seletividade para cada uma das amostras estudadas. Como era de se esperar, a AGEO 88 foi a amostra com melhor índice, com valor de 23. A AGEO 91 foi a amostra com pior índice de seletividade, seguida pela AGEO 77, com respectivos valores de 2,9 e 3,2. Os dados reafirmam que os minérios da AGEO 91 e AGEO 77 apresentam baixa seletividade na flotação, porém, as causas que levaram estes minérios a apresentarem desempenho inadequado são totalmente distintas. Pelos resultados da caracterização mineralógica na alimentação da flotação, discutidos no capítulo anterior, o minério da AGEO 77 apresentou condições de liberação mineral totalmente desfavoráveis ao processo de flotação, e por este motivo que a qualidade do concentrado obtido foi prejudicada. Já no caso da AGEO 91 o estudo da liberação mineral na alimentação da flotação não explica a baixa seletividade deste minério na etapa de flotação, e por essa razão, as causas da baixa seletividade deverão ser estudadas mais detalhadamente.

O índice de seletividade da AGEO 107 foi levemente inferior ao da AGEO 72, com valores de 6,1 e 7,3, respectivamente. Estes valores são reflexos dos teores

inadequados de sílica no concentrado e dos elevados teores de ferro no rejeito que essas amostras apresentaram após o processo de flotação. Assim como no caso da AGEO 77, as condições desfavoráveis para a flotação interpretadas no estudo de liberação mineral dessas amostras na alimentação da flotação foram as causas fundamentais para o desempenho ineficaz destes minérios na etapa de concentração.

Tabela V.16 – Resultados dos índices de seletividade para a etapa de flotação para cada uma das amostras estudadas.

	Índice de seletividade
AGEO 72	7,3
AGEO 77	3,2
AGEO 88	23,0
AGEO 91	2,9
AGEO 107	6,1

5.7.1 Estudo do posicionamento dos tipos de partículas após o processo de flotação

Neste subitem são apresentados os resultados da caracterização mineralógica dos diversos produtos da etapa de flotação, com figuras contendo os gráficos de setores com a distribuição dos tipos de partículas livres e mistas na alimentação da flotação, concentrado e rejeito da flotação, assim como os resultados da composição química e valores do grau de liberação do quartzo ou dos óxidos/hidróxido de ferro dos respectivos produtos da flotação. São apresentadas também as curvas de distribuição granulométrica das partículas e dos grãos de quartzo, hematita/magnetita e goethita dos concentrados e rejeitos.

O objetivo é discutir o posicionamento dos tipos de partículas diante do processo de flotação, se há tendências de posicionamento de acordo com as características das partículas ou pela composição mineralógica dessas partículas.

Na figura 5.59 são apresentados os dados referentes à AGEO 88, minério escolhido como referência dentre as amostras estudadas e que obteve os melhores resultados na flotação, com melhor qualidade do concentrado e melhor resultado de recuperação metálica, conforme descrito anteriormente.

Primeiramente, analisando as partículas livres, a tendência inerente ao processo de flotação é que o quartzo seja flotado enquanto que os grãos de óxidos/hidróxido de ferro se posicionem no concentrado. No caso da AGEO 88 houve uma tendência clara deste posicionamento, sendo o concentrado composto por 89% de partículas livres de óxidos/hidróxido de ferro e o rejeito por 73% de partículas liberadas de quartzo.

Nas fotomicrografias obtidas no MLR e no MLA apresentadas nas figuras 5.60 e 5.61, é possível observar o aspecto geral do concentrado obtido da AGEO 88 com predominância absoluta de partículas de óxidos/hidróxido de ferro.

Apesar da tendência clara de posicionamento das partículas liberadas, destaca-se a presença de 25% de partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro no rejeito (fotomicrografia da figura 5.62). É muito provável que em um processo de flotação ocorra arraste de partículas muito finas para a espuma. No caso da AGEO 88, acredita-se que as partículas de óxidos/hidróxido de ferro posicionadas no rejeito se devam ao processo de arraste mecânico durante o processo de flotação.

Pela figura 5.28 observa-se que o minério da AGEO 88, na fração mais fina da amostra (-0,044mm), é composto essencialmente por partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro (87%). Pelo gráfico da figura 5.63, onde são exibidas as curvas granulométricas dos grãos de quartzo, hematita/magnetita e goethita do rejeito, é possível observar que os grãos de hematita/magnetita e goethita no rejeito são extremamente mais finos do que os grãos de quartzo. Na fração 0,15mm (150 μ m) os grãos de óxidos/hidróxido de ferro apresentam granulometria 100% passante enquanto que os grãos de quartzo apresentam 90,6% passante. Na fração 0,044mm (44 μ m) a diferença granulométrica entre os grãos de óxidos/hidróxido de ferro com os grãos de quartzo é mais evidente, onde 74,2% dos grãos de hematitas/magnetita e 65,7% dos grãos de goethita são mais passantes nesta fração enquanto que os grãos de quartzo apresentam apenas 9,9% dos grãos passantes nesta faixa.

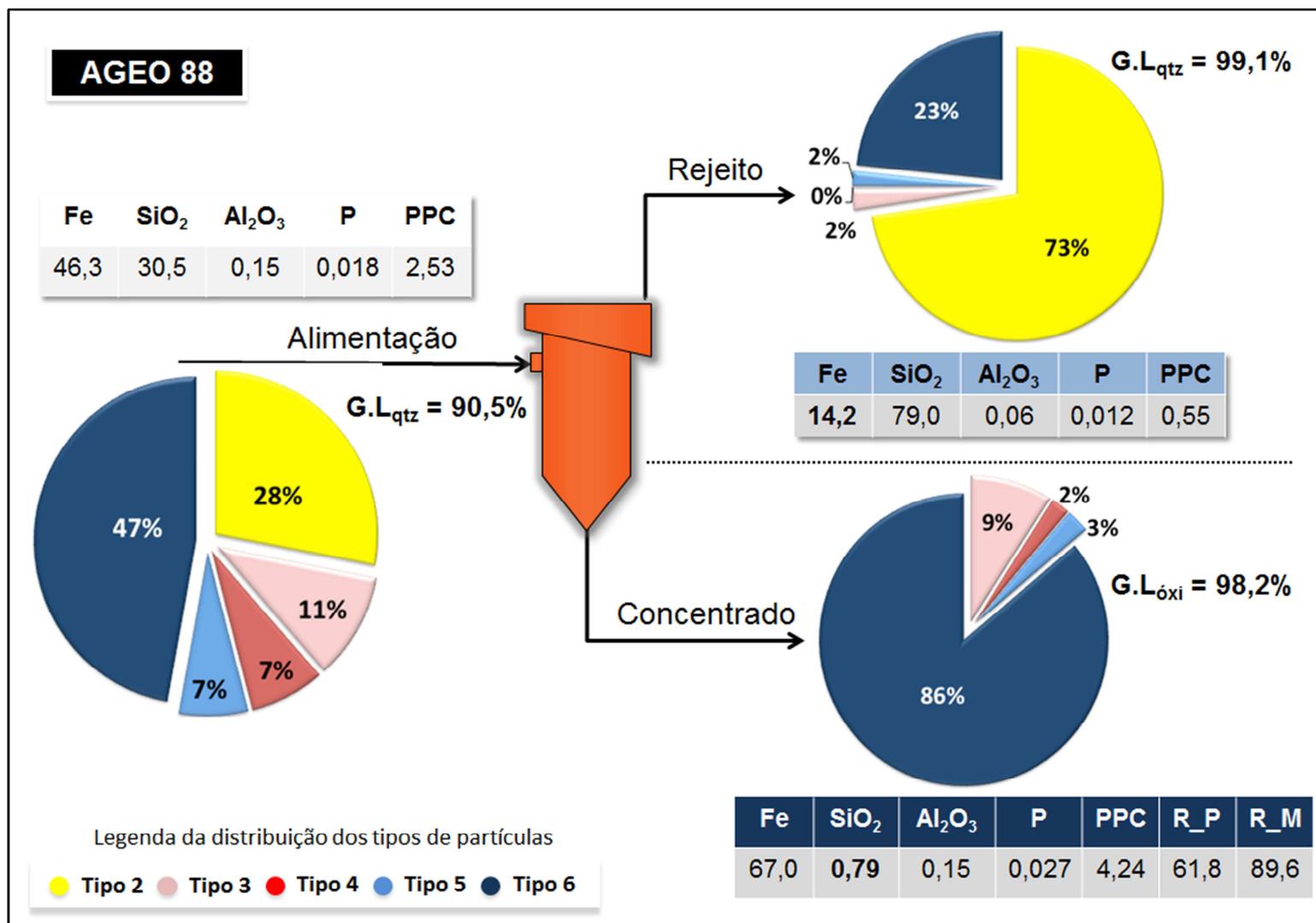


Figura 5.59 – AGEO 88: Distribuição dos tipos de partículas mistas e livres, grau de liberação do quartzo (G.L_{qtz}) e dos óxidos/hidróxido de ferro (G.L_{óxi}), qualidade química das alíquotas globais da alimentação, concentrado e rejeito da flotação.

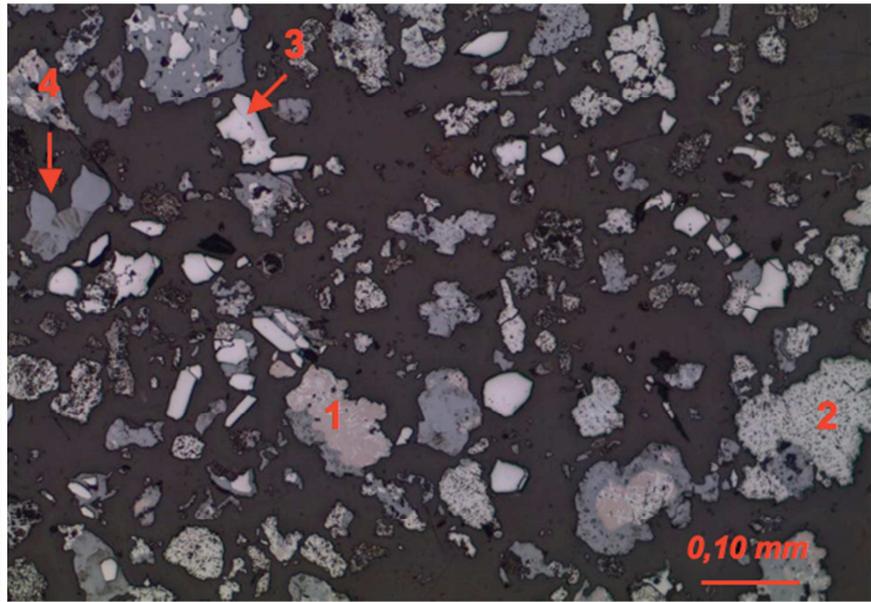


Figura 5.60 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 – concentrado – fração global. Aspecto geral do concentrado. 1 = Magnetita martitizada; 2 = Hematita martítica; 3 = Hematita lamelar; 4 = Goethita botrioidal. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.

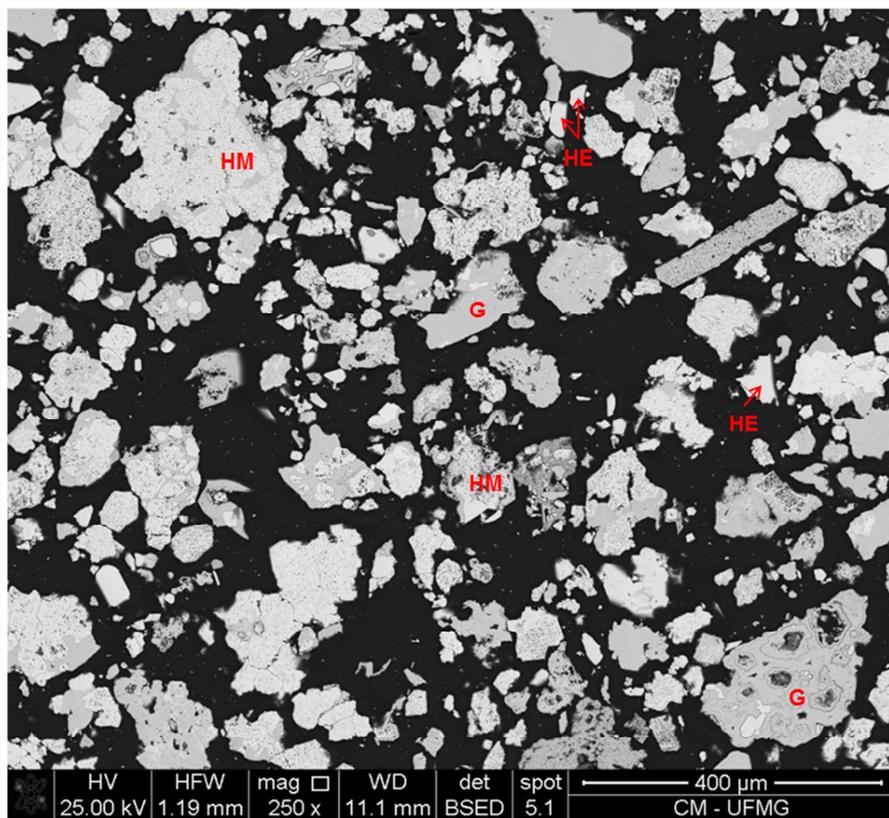


Figura 5.61 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 - Concentrado: fração global. Aspecto geral do concentrado com predominância de partículas compostas essencialmente por óxidos/hidróxido de ferro. (HE) hematita especular, (HM) hematita martítica (G) goethita. MEV- BSED.

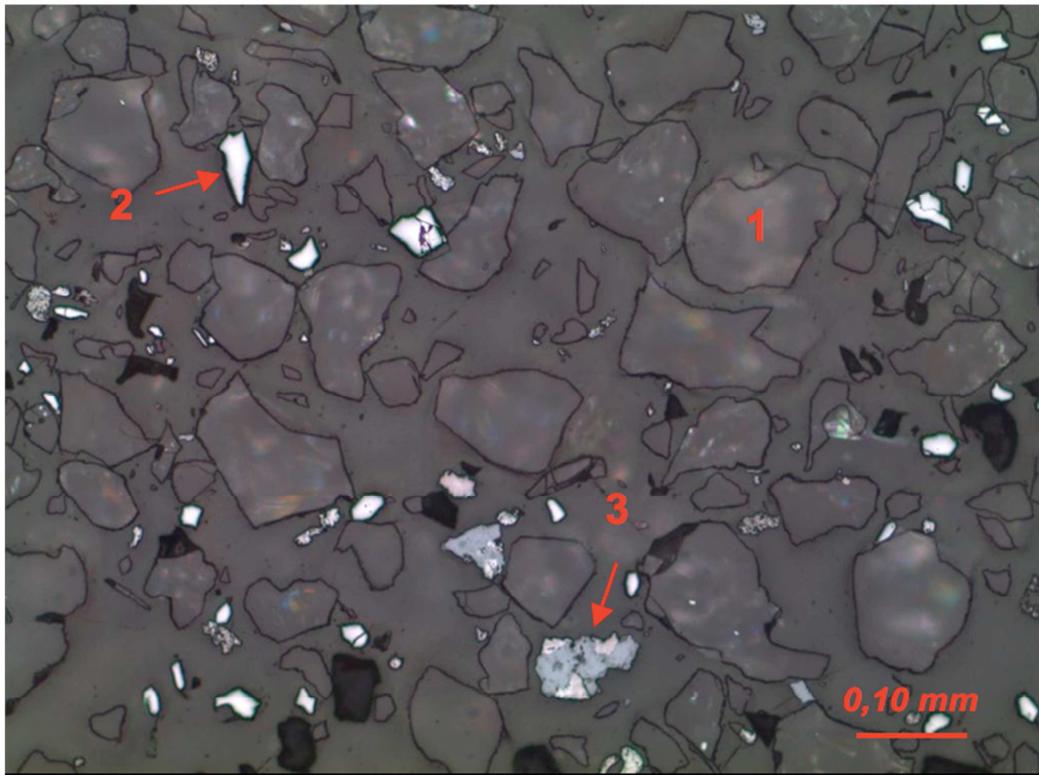


Figura 5.62 - Fotomicrografia da amostra AGEO 88 – rejeito – fração global. Aspecto geral do rejeito. 1 = Quartzo; 2 = Hematita lamelar; 3 = Goethita botrioidal. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x

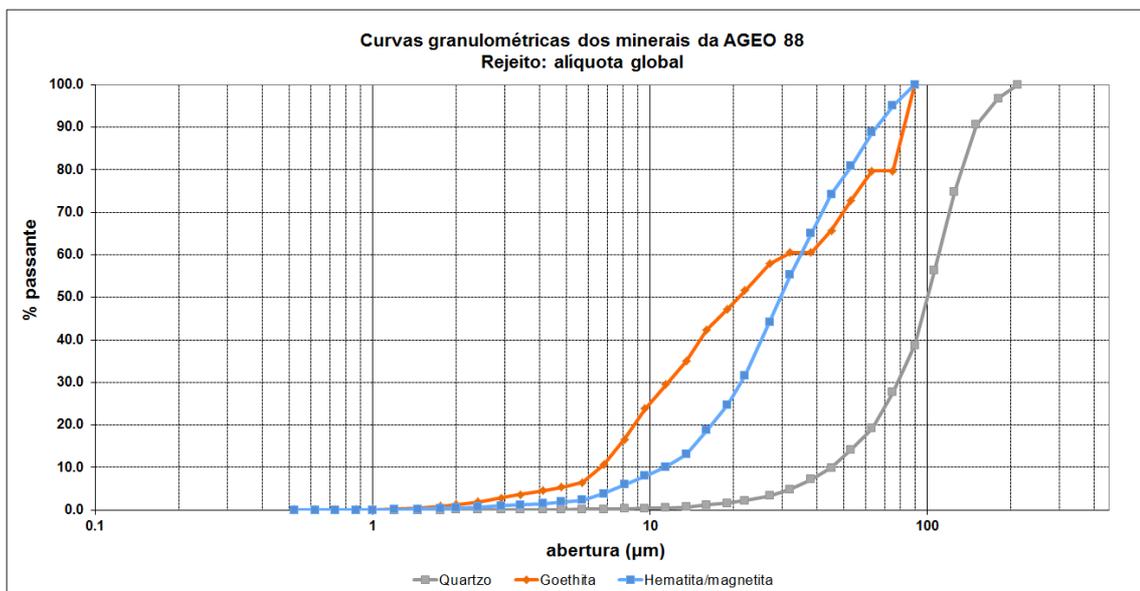


Figura 5.63 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 88, rejeito da flotação, alíquota global.

Alguns autores, citados por Turrer (2007), discutem hipóteses para o arraste de partículas de óxidos/hidróxido de ferro para o rejeito. Leja (1982) alega que a intensidade de adsorção do amido em partículas minerais finas seja menor do que em partículas minerais mais grosseiras e esse fato contribuiria para o arraste de partículas minerais de ferro para o flotado. Fuerstenau (1980) afirma que devido à baixa massa e momento das partículas finas, pode haver arraste em líquidos ou aprisionamento em partículas flotadas. Hemmings (1974) obteve indicações de que partículas finas tendem a aderir na interface líquido-ar, assim, partículas hidrofílicas poderiam ser transportadas para a região da espuma nessa interface.

Em contrapartida, praticamente nenhuma partícula liberada de quartzo se posicionou no concentrado.

Com relação às partículas mistas, na alimentação da flotação somavam 18%, sendo que 11% correspondem às partículas mistas tipo 3 e outros 7% de partículas mistas complexas tipo 4. Conforme discutido no capítulo anterior, item 5.6, detalhando a distribuição da composição mineralógica dessas partículas (figura 5.29) é possível constatar que, considerando o total de partículas mistas na alimentação da flotação, 76% das partículas apresentam composição mineralógica com mais de 50% de óxido e/ou hidróxido de ferro e apenas 24% das partículas mistas são constituídas essencialmente de quartzo. Desta forma, pela composição mineralógica predominante das partículas mistas por óxidos/hidróxido de ferro, foi interpretado que essas partículas mistas, no processo de flotação, tenderiam a posicionar-se no concentrado.

De fato, pelo gráfico de setores da alíquota de concentrado da AGEO 88 (figura 5.59), é possível perceber que 11% das partículas são mistas, sendo que 9% são de partículas mistas tipo 3 e 2% de partículas mistas complexas tipo 4. Já no rejeito, as partículas mistas somam apenas 2%.

Portanto, houve a tendência de posicionamento das partículas mistas no concentrado pela composição mineralógica dessas partículas, previamente interpretada na caracterização mineralógica das alíquotas da alimentação da flotação.

A título de ilustração, na fotomicrografia 5.64a é possível observar uma belíssima partícula composta por hematita martítica, com a hematita formada segundo os planos, ou entre os planos, octaédricos da magnetita, exibindo uma textura em treliça, bordejada por uma goethita exibindo habitus botrioidal. Na figura 5.64b é apresentado um zoom do interior do grão da hematita martítica destacando a textura em treliça.

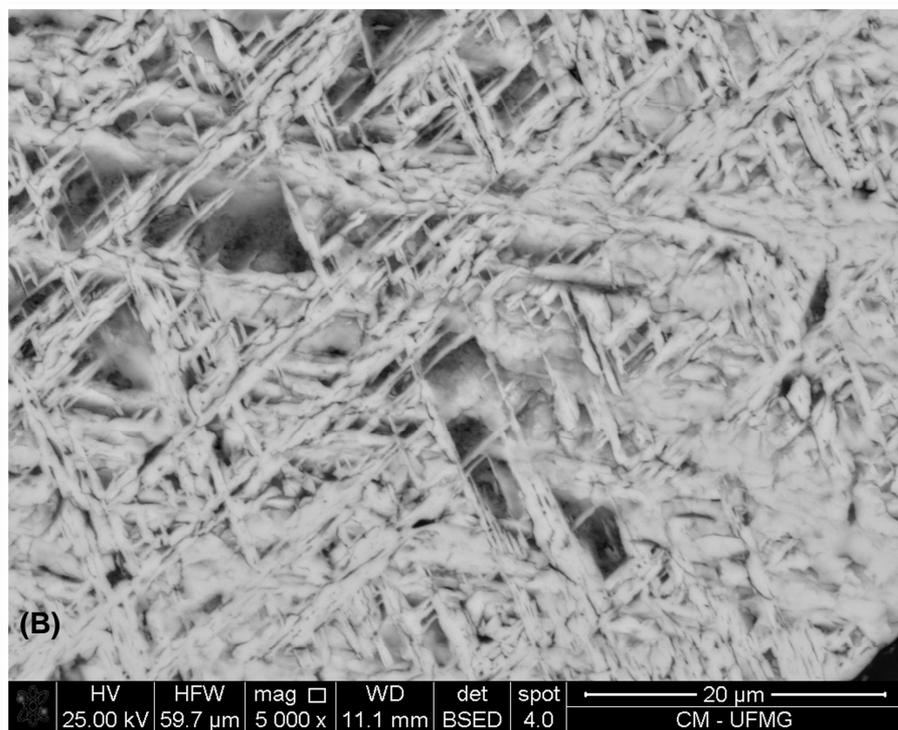
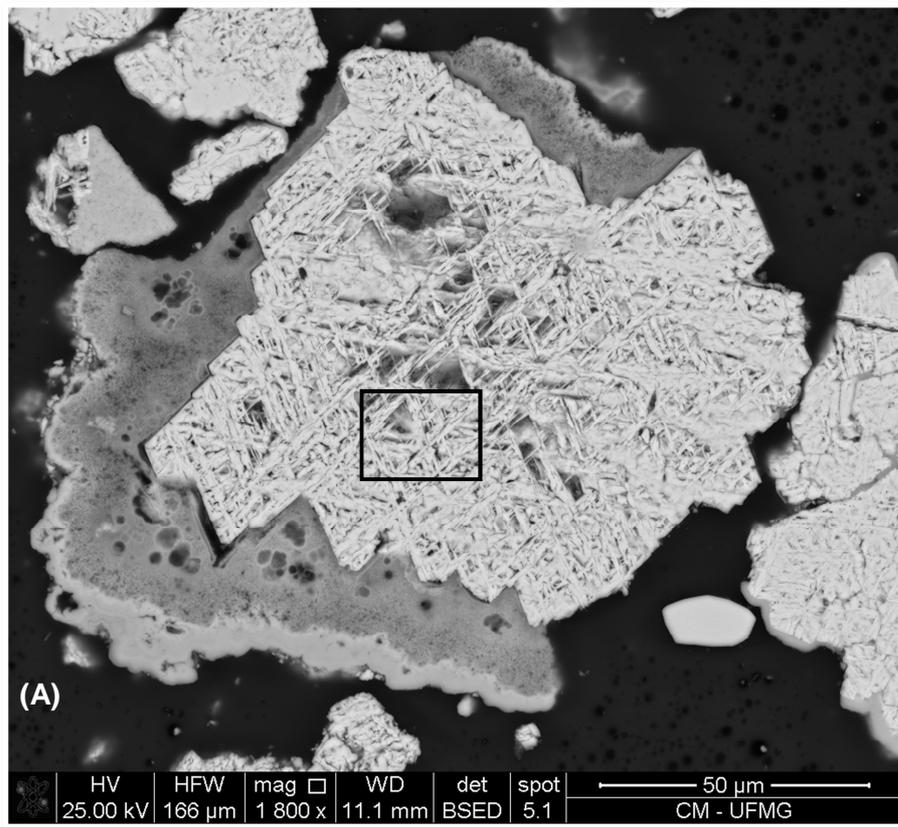


Figura 5.64 - Fotomicrografia da amostra AGE0 88 - Concentrado: fração global. (a) partícula composta por hematita martítica contornada por goethita. (b) destaque da textura em treliça da hematita martítica. MEV- BSED.

O minério da AGEO 72 não apresentou performance satisfatória na flotação, mas foi a amostra com melhores resultados dentre as piores, com maior índice de seletividade, menor teor de ferro no rejeito e teor de SiO₂ próximo ao AGEO 107.

Na figura 5.65 são demonstrados os gráficos de setores da alimentação da flotação, concentrado e rejeito da AGEO 72. As partículas liberadas de quartzo e óxidos/hidróxido de ferro obedeceram a tendência natural dentro de um processo de flotação. No concentrado, 69% das partículas representam as partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro e apenas 1% são de quartzo livre, enquanto que no rejeito 69% das partículas são de quartzo livre e 6% de óxidos/hidróxido de ferro livres.

Nesta amostra, o processo de arraste de partículas de óxidos/hidróxido de ferro para o rejeito foi bem menos expressivo do que na AGEO 88. Pelo gráfico de distribuição granulométrica dos grãos de quartzo, goethita e hematita/magnetita apresentado na figura 5.66 é possível observar que os grãos de óxidos/hidróxido de ferro não são expressivamente mais finos do que os grãos de quartzo quanto no rejeito da AGEO 88.

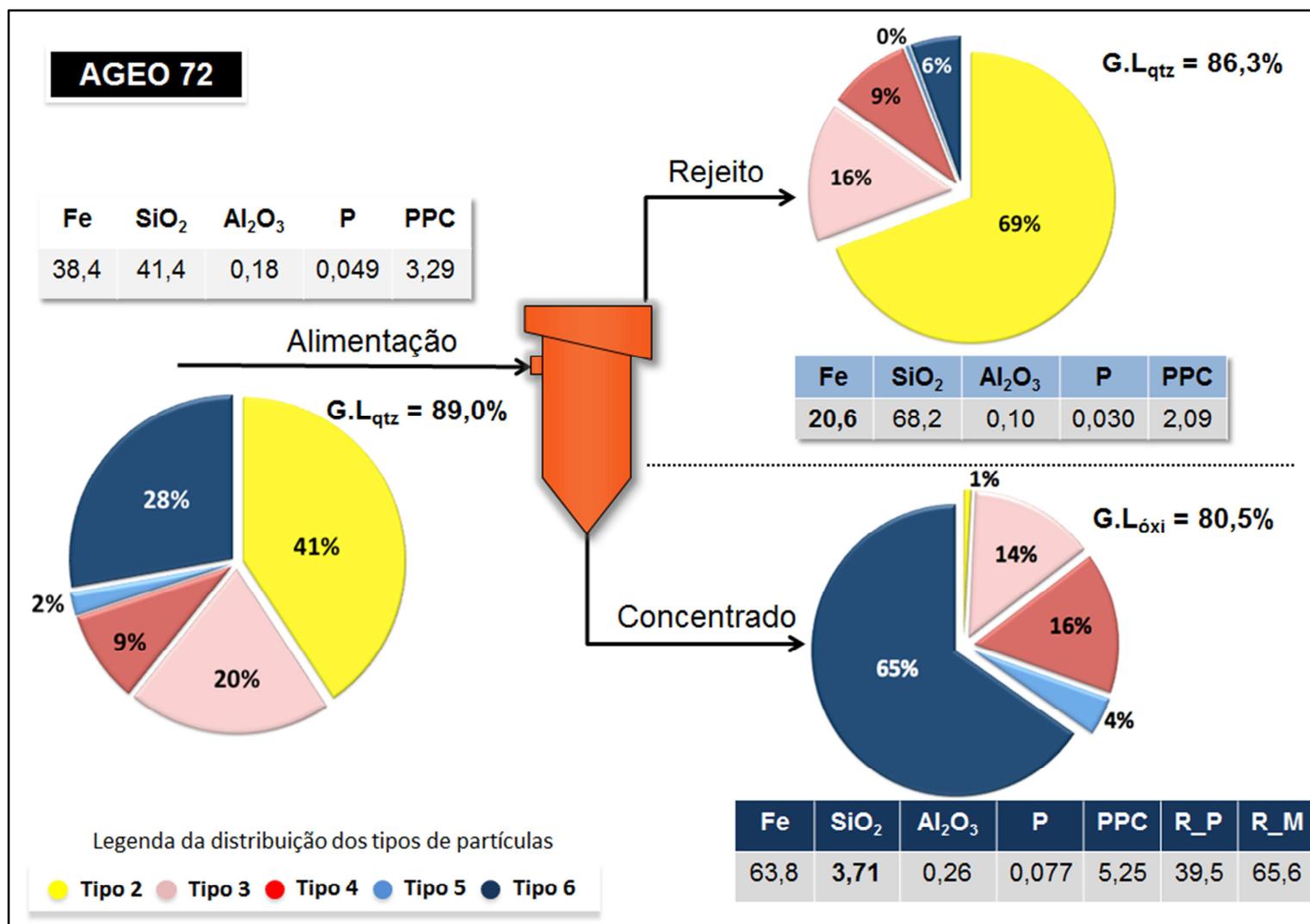


Figura 5.65 - AGEO 72: Distribuição dos tipos de partículas mistas e livres, grau de liberação do quartzo (G.L_{qtz}) e dos óxidos/hidróxido de ferro (G.L_{óxi}), qualidade química das alíquotas globais da alimentação, concentrado e rejeito da flotação.

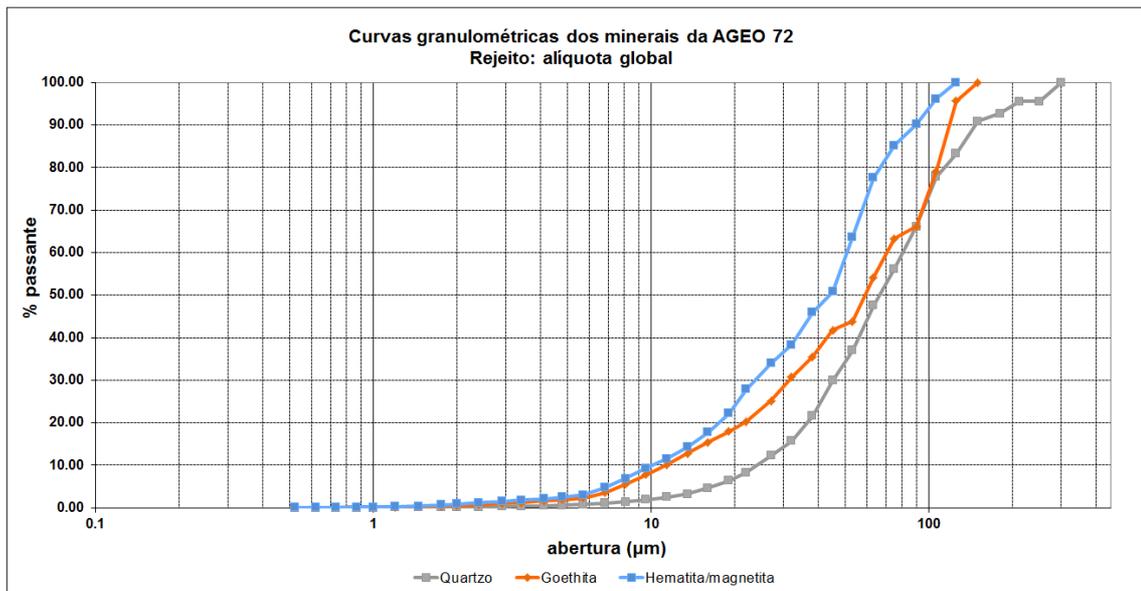


Figura 5.66 – Curva granulométrica dos grãos de quartzo, hematitas/magnetita e goethita da AGEO 72, rejeito da flotação, alíquota global.

O processo de arraste mecânico das partículas mais finas de óxidos/hidróxido de ferro pode ter sido sobreposto pela presença de grande quantidade de partículas mistas no sistema. Pela figura 5.65 é possível observar que aparentemente houve um posicionamento aleatório das partículas mistas no concentrado ou no rejeito, sem qualquer tendência clara, diferentemente do caso da AGEO 88.

Na alimentação da flotação eram 29% de partículas mistas, considerando as partículas tipo 3 e tipo 4, no concentrado as partículas mistas somam 30% e no rejeito equivalem a 25%.

No capítulo anterior foi demonstrado, a partir da caracterização mineralógica da alíquota da alimentação da flotação, que grande parte das partículas mistas são compostas essencialmente por óxidos/hidróxido de ferro, cerca de 69%. O entendimento foi que a tendência de posicionamento dessas partículas mistas seria no concentrado.

Contudo, 33% das partículas mistas não são compostas essencialmente por óxidos/hidróxido de ferro, sendo 24% das partículas mistas com menos de 50% de óxidos/hidróxido de ferro e 7% das partículas mistas com mais de 90% de quartzo na sua composição mineralógica. Essas partículas tendem a seguir para o rejeito.

Na figura 5.67 são apresentados os gráficos de setores da composição mineralógica das partículas mistas, tipo 3 e tipo 4, presentes no concentrado e no rejeito. Esta figura é interessantíssima pois demonstra que o posicionamento das partículas mistas não foi totalmente aleatório pois seguiu uma tendência de acordo com a composição mineralógica das partículas.

No concentrado, é possível observar que 80% das partículas mistas são compostas predominantemente por óxidos/hidróxido de ferro (<50%) e apenas 20% das partículas são compostas predominantemente por quartzo, entre 10% e 50% de óxidos/hidróxido de ferro. No rejeito ocorreu o inverso, 65% das partículas mistas posicionadas no flotado são compostas essencialmente por quartzo e 35% das partículas são compostas por mais de 50% de óxidos/hidróxido de ferro.

A presença das partículas mistas na alimentação da flotação, com o posicionamento dessas partículas no concentrado ou rejeito, de acordo com a composição mineralógica, trouxe prejuízos à qualidade do concentrado obtido, com teor de SiO_2 fora dos limites aceitáveis e queda na recuperação em peso e metálica.

Nas fotomicrografias apresentadas nas figuras 5.68 e 5.69 é possível observar o aspecto geral do concentrado e rejeito da flotação. Em ambos os produtos percebe-se a presença das partículas mistas. Na fotomicrografia da figura 5.70 destaca-se uma partícula mista posicionada no concentrado da AGEO 72, exemplo de uma partícula mista complexa tipo 4, composta por quartzo, goethita e hematita martítica. Na fotomicrografia da figura 5.71 é apresentada uma belíssima goethita fibrosa, pseudomórfica de anfibólio.

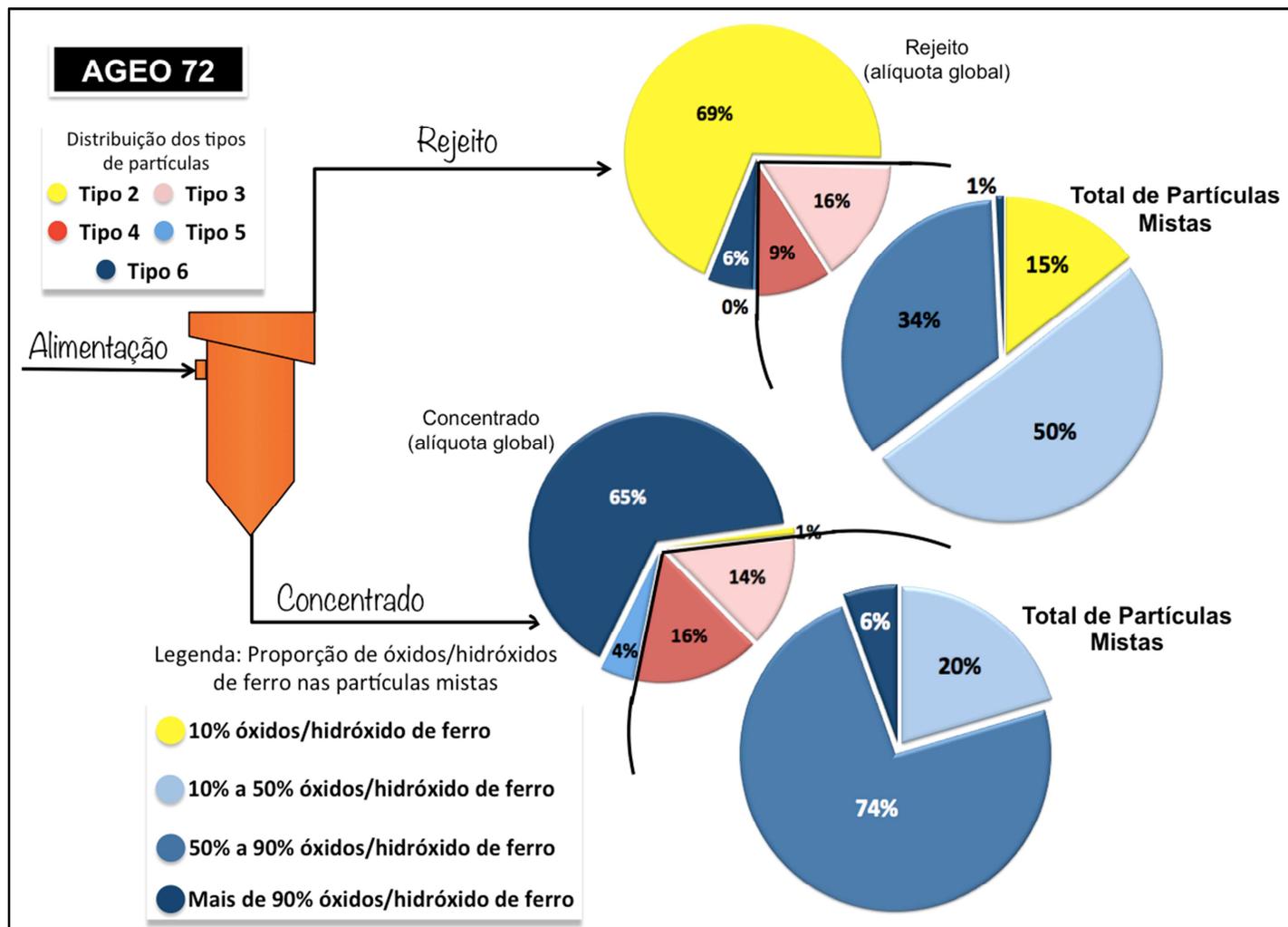


Figura 5.67 – AGEO 72: Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas do concentrado e rejeito da flotação, alíquota global.

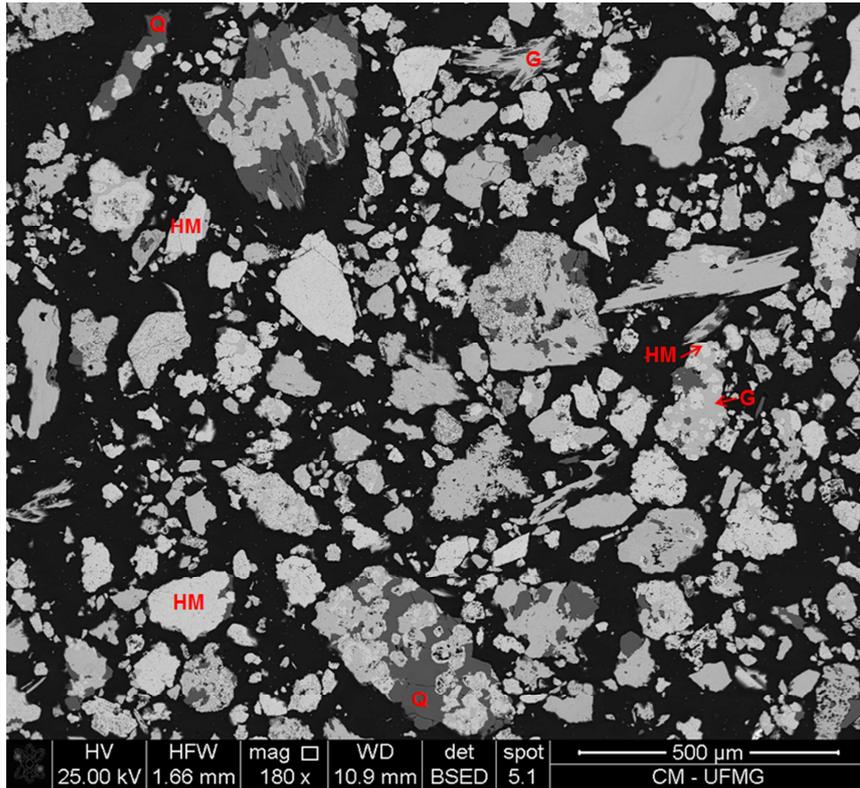


Figura 5.68 - Fotomicrografia da amostra AGE0 72 - Concentrado: fração global. Aspecto geral do concentrado da AGE0 72. (Q) quartzo, (HM) hematita martítica, (G) goethita. MEV- BSED.

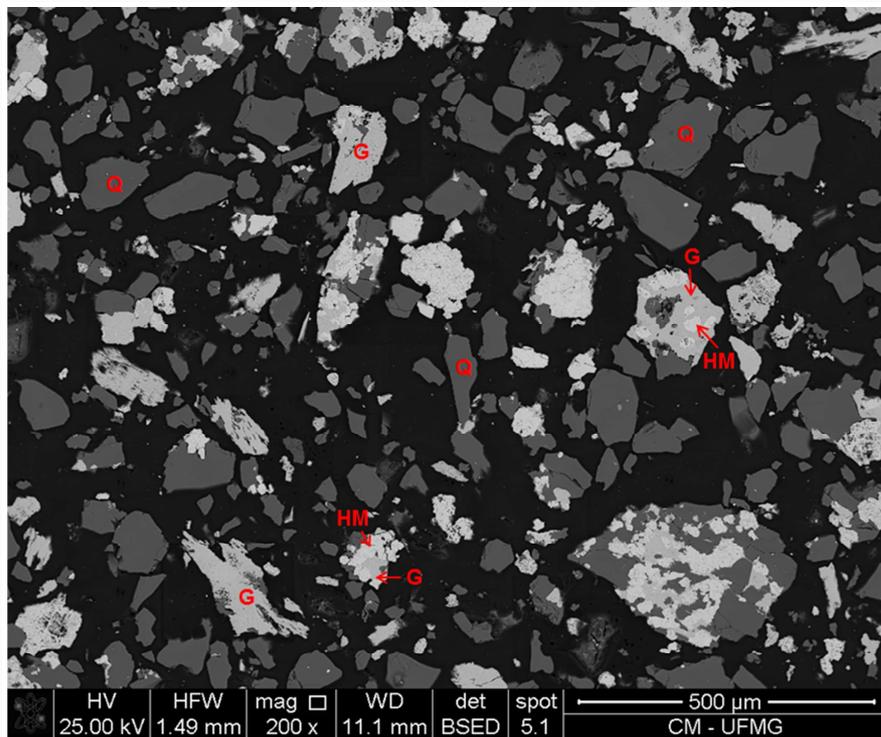


Figura 5.69 - Fotomicrografia da amostra AGE0 72 - Rejeito: fração global. Aspecto geral do rejeito da AGE0 72. (Q) quartzo, (HM) hematita martítica, (G) goethita. MEV- BSED.

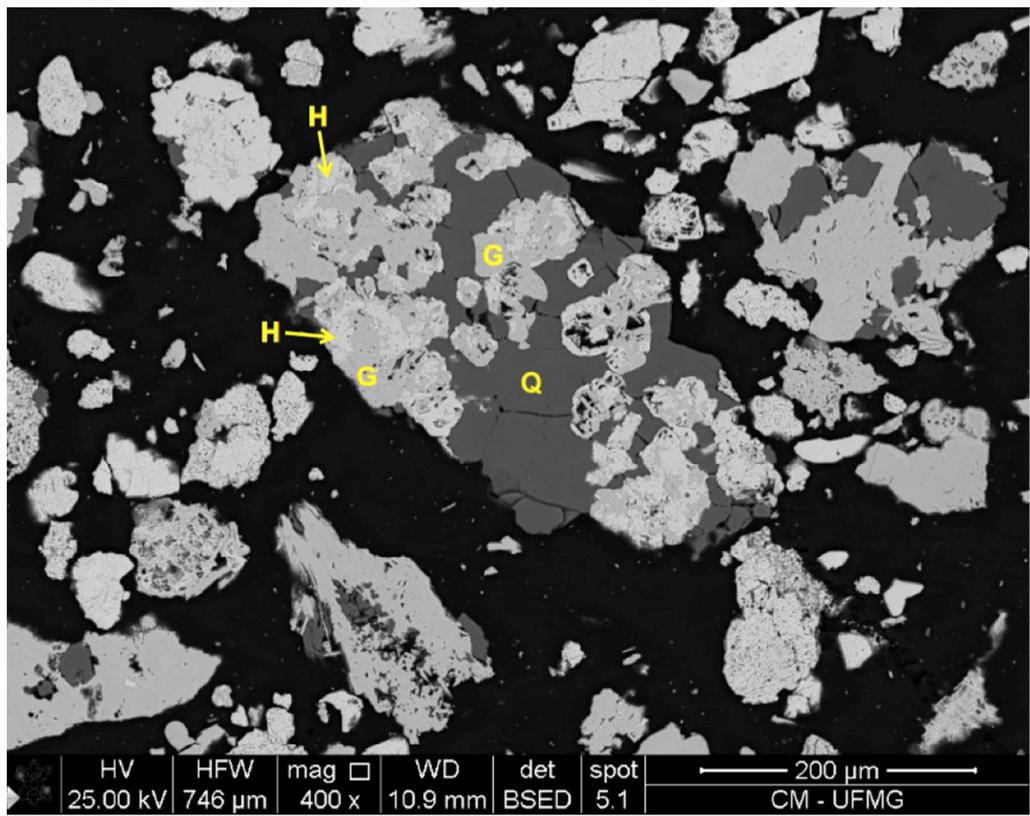


Figura 5.70 - Fotomicrografia da amostra AGE0 72 - Concentrado: fração global. Destaque no centro da imagem para uma partícula mista complexa tipo 4, composta por quartzo (Q), goethita (G) e hematita (H). MEV- BSED.

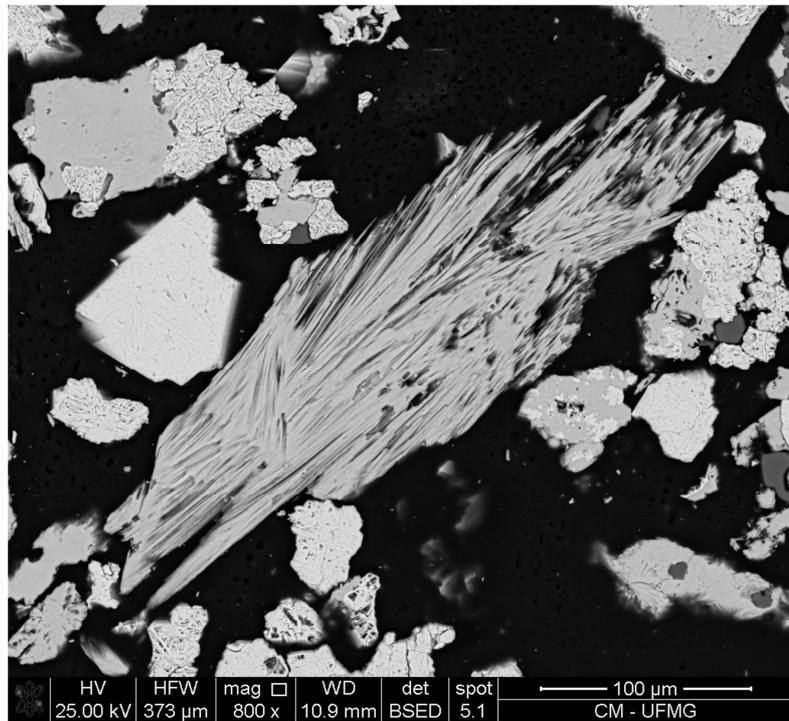


Figura 5.71 - Fotomicrografia da amostra AGE0 72 - Concentrado: fração global. Belíssima goethita fibrosa, pseudomórfica de anfibólio. MEV- BSED.

Com relação ao minério da AGEO 77, as condições de liberação na alimentação da flotação foram causas fundamentais para obtenção de um concentrado de qualidade marginal. Na figura 5.72 são apresentados os gráficos de setores para a análise quanto ao posicionamento das partículas, livres e mistas, diante do processo de flotação.

As partículas livres de quartzo e de óxidos/hidróxido de ferro apresentaram, em grande parte, a tendência natural de posicionamento em um processo de flotação. No concentrado, 69% correspondem a partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro e no rejeito 58% são de partículas liberadas de quartzo. Por problemas de seletividade, talvez pelo grande volume de partículas mistas no sistema, houve um equívoco de posicionamento de algumas partículas livres com 6% de partículas livres de quartzo se posicionaram no concentrado e 7% de partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro foram arrastadas para a região da espuma.

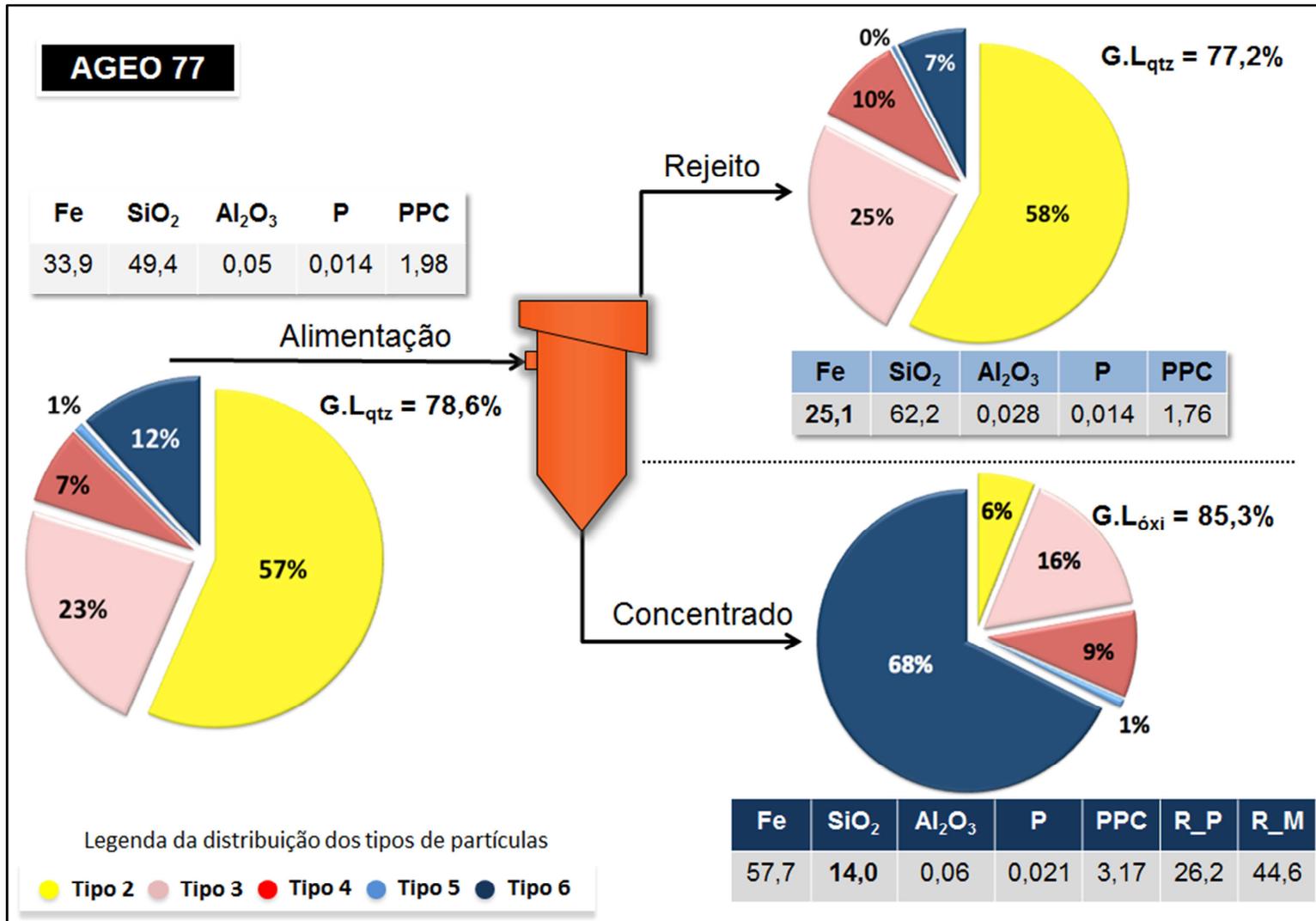


Figura 5.72 – AGEO 77: Distribuição dos tipos de partículas mistas e livres, grau de liberação do quartzo (G.L_{qtz}) e dos óxidos/hidróxido de ferro (G.L_{óxi}), qualidade química das alíquotas globais da alimentação, concentrado e rejeito da flotação.

Pela composição mineralógica das partículas mistas, descrita no item 5.6 (figura 5.42), foi interpretado que o posicionamento dessas partículas mistas teria um caráter mais aleatório, podendo posicionar-se tanto no concentrado como seguir para o rejeito.

De fato, pela figura 5.72 é possível observar que o concentrado é composto por 25% de partículas mistas, sendo 16% de partículas tipo 3 e 9% são de partículas mistas complexas tipo 4. No rejeito, 35% das partículas presentes são mistas, sendo que 25% correspondem a partículas mistas tipo 3 e 10% a partículas mistas tipo 4.

Na figura 5.73 é apresentada a composição mineralógica das partículas mistas presentes no concentrado e no rejeito. Diferentemente do que acontece na AGEO 72, não é tão evidente o posicionamento preferencial das partículas mistas de acordo com sua composição mineralógica, principalmente no caso do concentrado.

No concentrado, as partículas mistas se dividem entre partículas compostas predominantemente por óxidos/hidróxido de ferro (49%) e partículas compostas majoritariamente por quartzo (51%). No rejeito, há um maior predomínio de partículas mistas compostas essencialmente por quartzo, cerca de 70%, enquanto que 30% são de partículas compostas por mais de 50% de óxidos ou hidróxido de ferro.

Mais claro do que no caso da AGEO 72, a grande quantidade de partículas mistas na alimentação da flotação, com o posicionamento tanto no concentrado como no rejeito, trouxeram muitas dificuldades ao processo de concentração, com obtenção de um concentrado de qualidade marginal e índices não satisfatórios de recuperação em peso e metálica.

Nas figuras 5.74 e 5.75 são apresentados fotomicrografias obtidas por meio do MLR e MLA mostrando o aspecto geral do concentrado da AGEO 77. Em ambas as imagens é notável a presença expressiva de partículas mistas, responsáveis pelo alto teor de SiO_2 no concentrado. Na fotomicrografia da figura 5.76 é exibida um exemplo de partícula mista tipo 4, composta por quartzo, hematita e goethita pseudomórfica de anfibólio.

Nas fotomicrografias das figuras 5.77 e 5.78 é possível observar o aspecto geral do rejeito da AGEO 77, também composto por muitas partículas mistas, refletindo no elevado teor de ferro do rejeito.

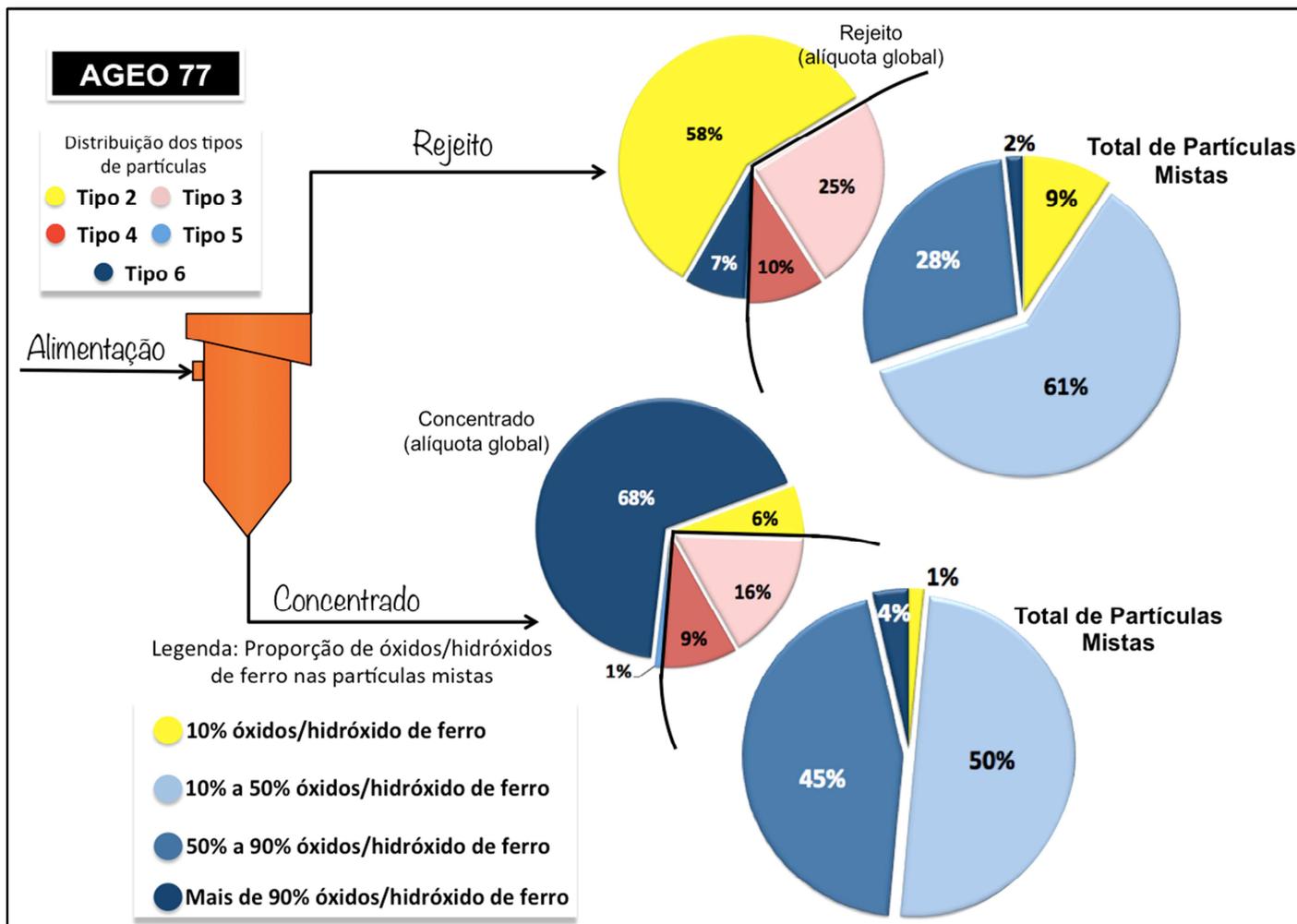


Figura 5.73 – AGEO 77: Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas do concentrado e rejeito da flotação, alíquota global.

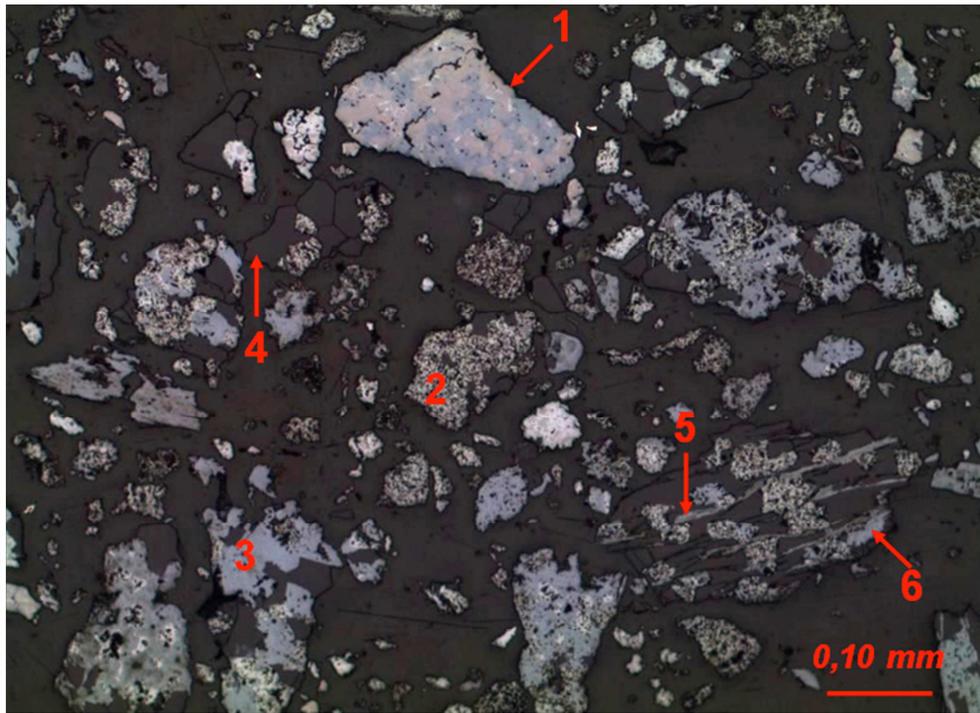


Figura 5.74 - Fotomicrografia da amostra AGEO 77 – concentrado – fração global. Aspecto geral do concentrado. 1 = Magnetita martitizada; 2 = Hematita martítica; 3 = Goethita botrioidal; 4 = Quartzo; 5 e 6 = Goethita pseudomórfica de anfibólio. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.

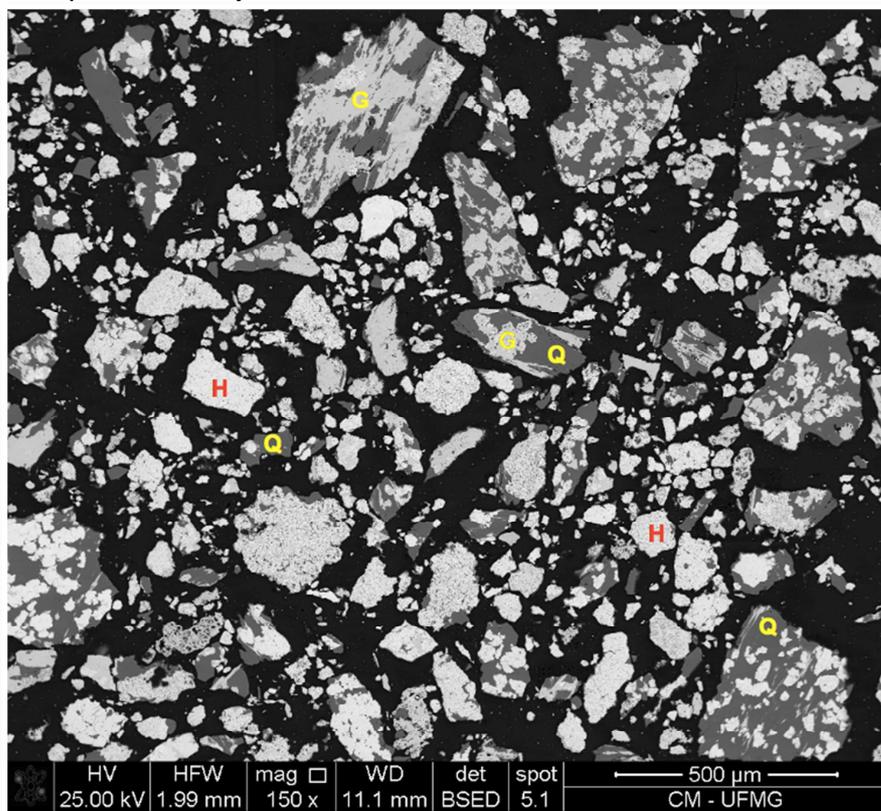


Figura 5.75 - Fotomicrografia da amostra AGEO 77 - Concentrado: fração global. Aspecto geral do concentrado. (Q) quartzo, (H) hematita, (G) goethita. MEV- BSED.

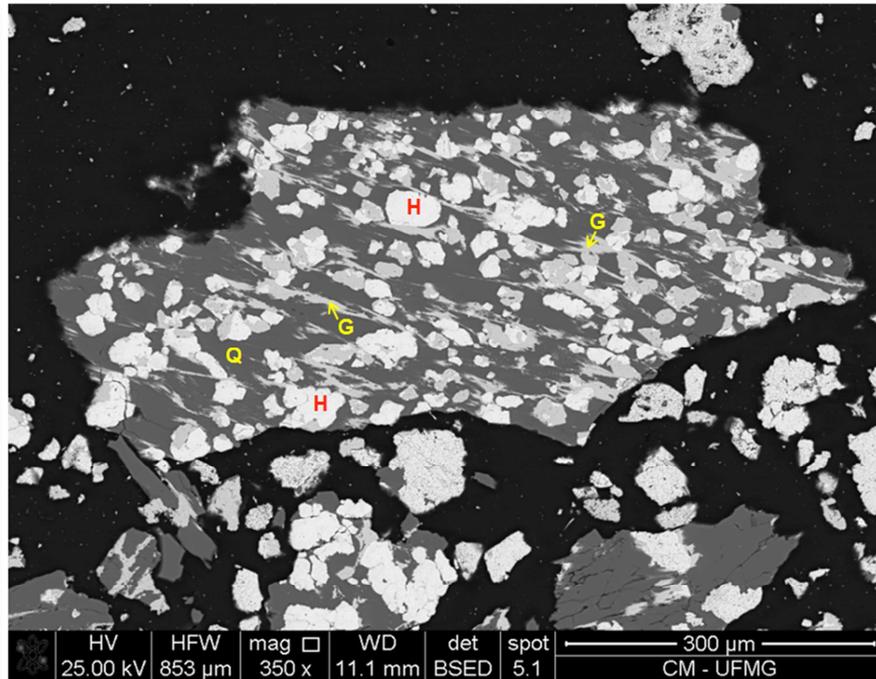


Figura 5.76 - Fotomicrografia da amostra AGE0 77 - Concentrado: fração global. Na região central da imagem, um exemplo de uma partícula mista complexa tipo 4, composta por quartzo (Q), goethita pseudomórfica de anfibólio (G) e hematita (H). MEV- BSED.

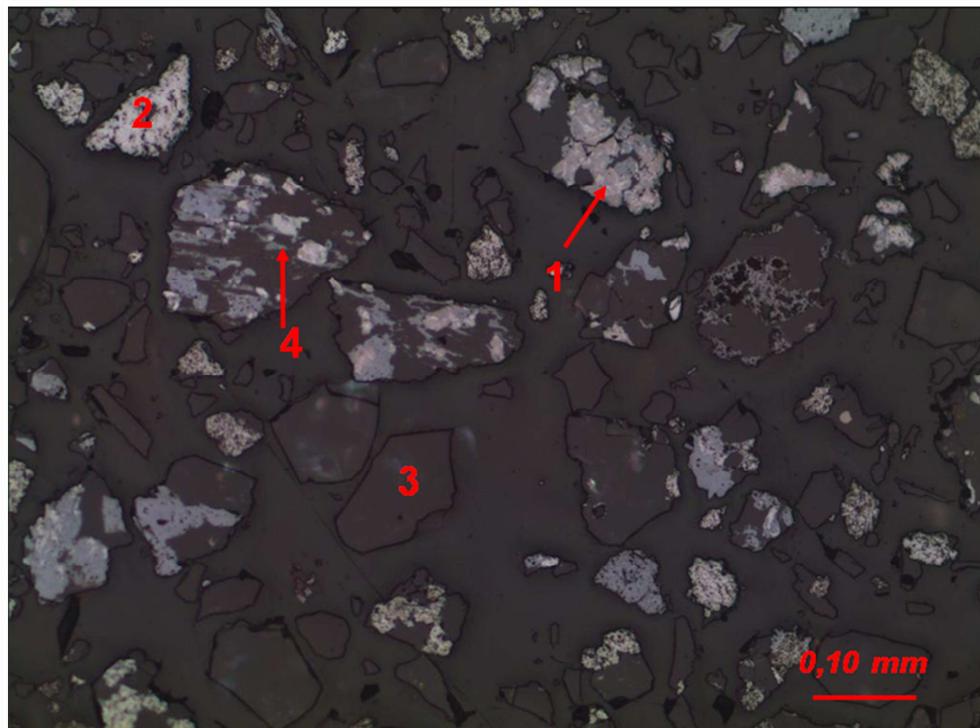


Figura 5.77 - Fotomicrografia da amostra AGE0 77 – rejeito – fração global. Aspecto geral do rejeito. 1 = Magnetita martitizada; 2 = Hematita martítica; 3 = Quartzo; 4 = Goethita pseudomórfica de anfibólio. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.

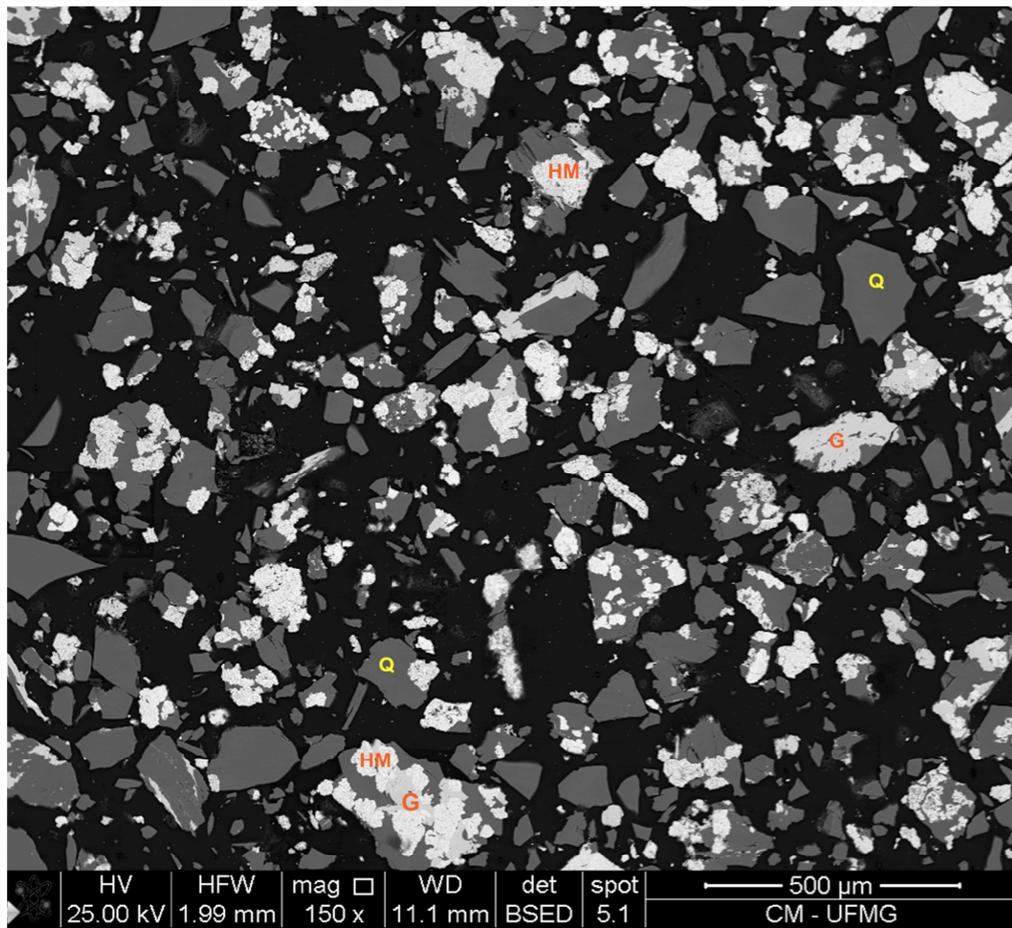


Figura 5.78 - Fotomicrografia da amostra AGEO 77 - rejeito: fração global. Aspecto geral do rejeito. (Q) quartzo, (HM) hematita martítica, (G) goethita MEV- BSED.

A AGEO 107 apresentou qualidade ruim no concentrado, assim como a AGEO 72. O teor de SiO_2 no concentrado foi levemente inferior e o teor de ferro no rejeito superior ao teor da AGEO 72. No fim das contas, o índice de seletividade da AGEO 107 foi inferior ao da AGEO 72.

Apesar dos resultados semelhantes na flotação, as condições de liberação mineral na alimentação da flotação dessas amostras foram muito distintas. Na figura 5.79 estão apresentados os gráficos de setores para avaliação do posicionamento das partículas diante do processo de flotação.

As partículas livres de quartzo se posicionaram majoritariamente no rejeito, em acordo com o que se prevê no processo de flotação. No rejeito 43% das partículas correspondem a quartzo livres e no concentrado são apenas 2%.

As partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro já não apresentaram seletividade adequada, pois no rejeito são 30% do total de partículas, justificando o elevado teor de ferro no rejeito desta amostra. No concentrado, 75% das partículas equivalem às partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro.

Assim como no caso da AGEO 88, a presença de partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro no rejeito ocorreu pelo arraste mecânico de partículas muito finas deste mineral. Além disso, o minério da AGEO 107 é o único composto majoritariamente por hematita especular, que apresenta habitus lamelar podendo favorecer ao processo de arraste para a espuma, principalmente se for muito fina.

Com relação às partículas mistas, assim como na AGEO 72 e AGEO 77, houve posicionamento tanto no concentrado como no rejeito. No concentrado são 23% de partículas mistas, sendo 18% de partículas mistas tipo 3 e 5% de partículas mistas complexas tipo 4. Já no rejeito são 27% de partículas mistas com 23% de partículas mistas tipo 3 e 4% de partículas mistas tipo 4.

Avaliando a composição mineralógica das partículas mistas (figura 5.80), é possível observar que no caso das partículas posicionadas no concentrado quase a totalidade são compostas majoritariamente por óxidos/hidróxido de ferro, com 92% das partículas sendo compostas por mais de 50% de óxidos ou hidróxido de ferro. Neste caso fica claro que, a composição mineralógica dessas partículas mistas, foi determinante para condicionar o seu posicionamento.

Analisando a alíquota de rejeito, é possível observar que não há um predomínio de partículas mistas compostas essencialmente por quartzo. Do total de partículas mistas 45% são compostas por mais de 50% de óxidos/hidróxido de ferro e outros 55% de partículas são compostas majoritariamente por quartzo. As partículas predominantemente compostas por quartzo se posicionaram no rejeito, como era de se esperar, e parte das partículas compostas essencialmente por óxidos/hidróxido de ferro foram carregadas para o rejeito, contribuindo assim para o elevado teor de ferro do rejeito desta amostra.

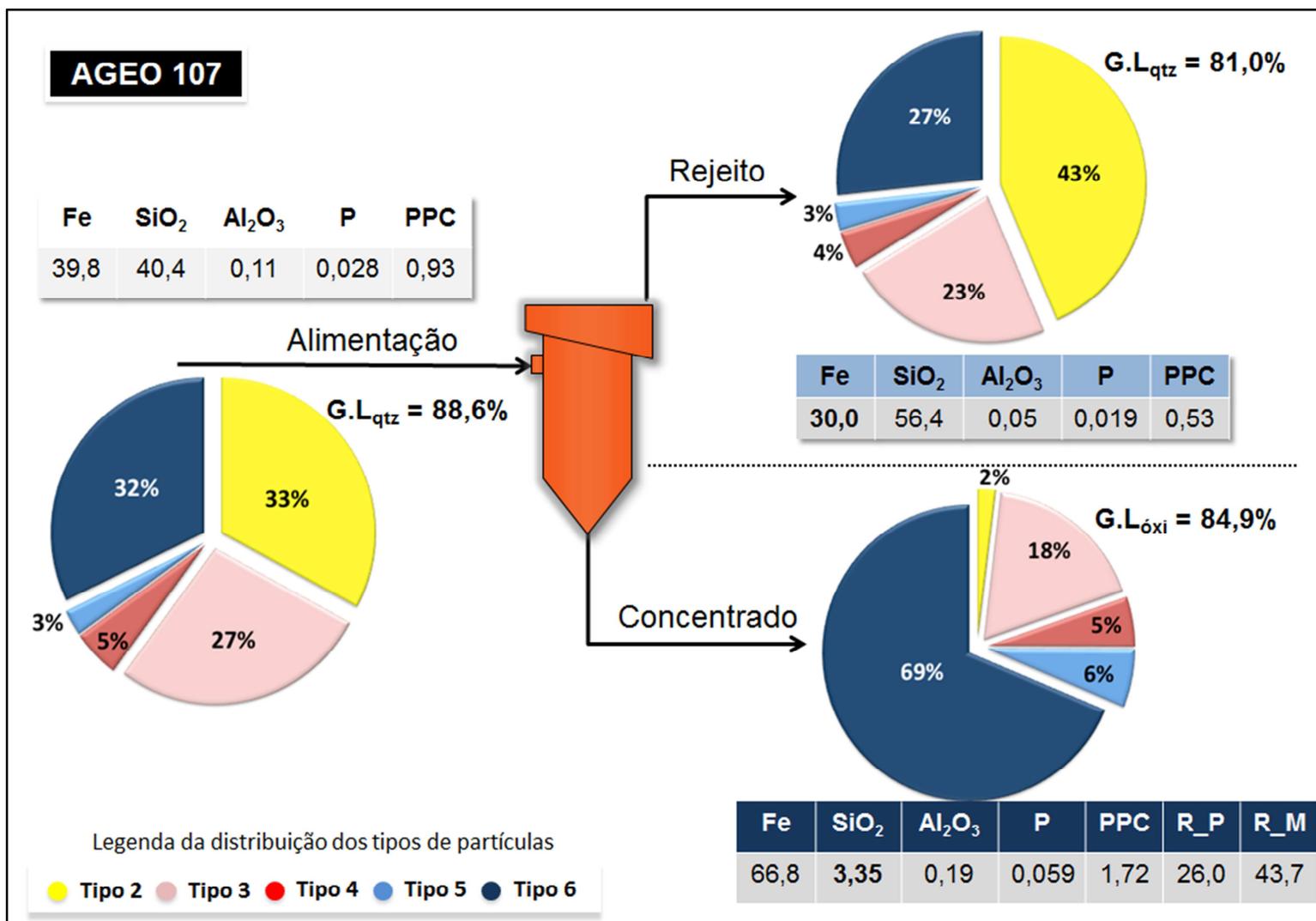


Figura 5.79 – AGEO 107: Distribuição dos tipos de partículas mistas e livres, grau de liberação do quartzo (G.L_{qtz}) e dos óxidos/hidróxido de ferro (G.L_{óxi}), qualidade química das alíquotas globais da alimentação, concentrado e rejeito da flotação.

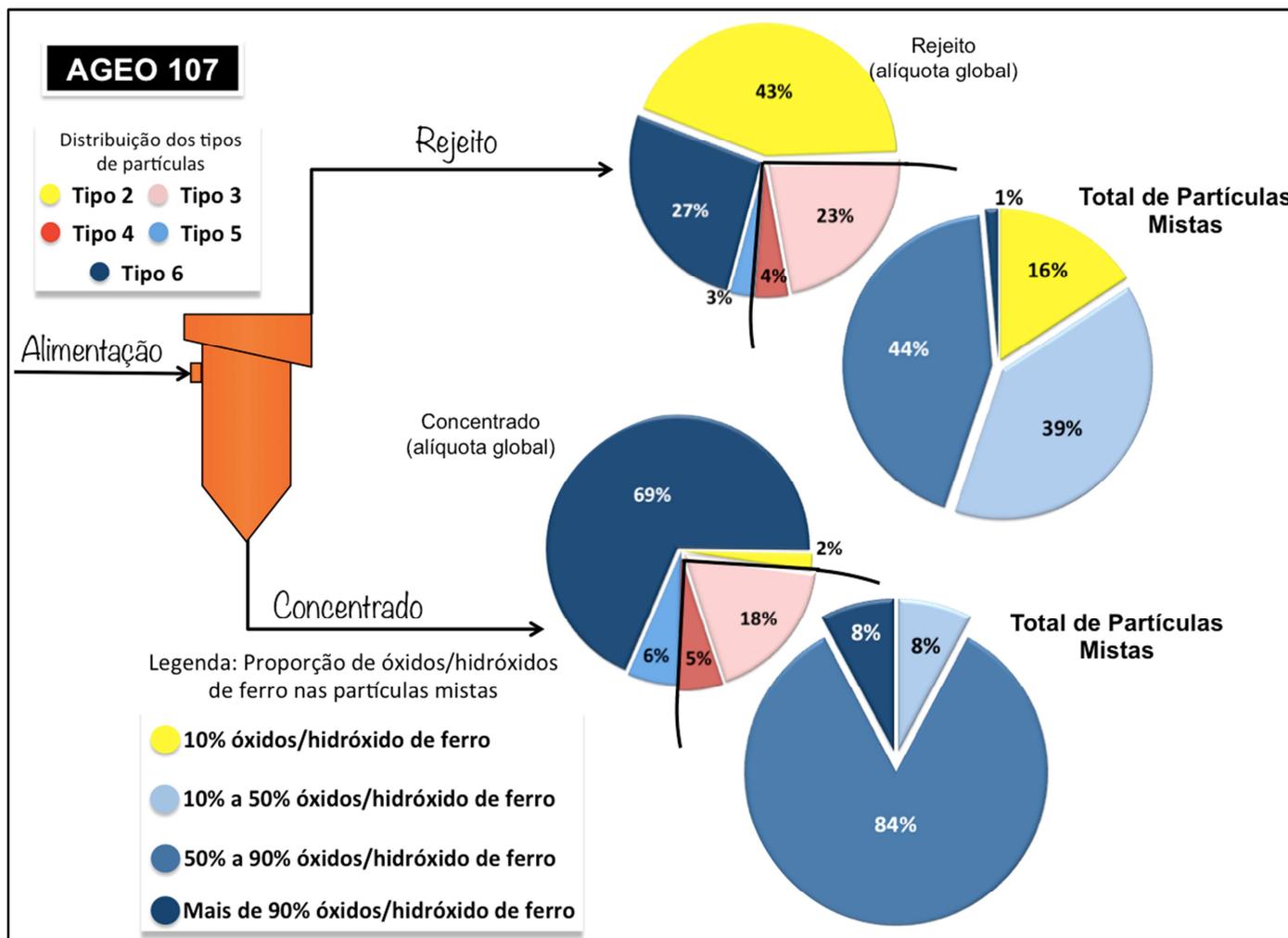


Figura 5.80 - AGEO 107: Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas do concentrado e rejeito da flotação, alíquota global.

Na fotomicrografia da figura 5.81, obtida no MLR, é possível observar o aspecto geral do concentrado da AGEO 107. Na fotomicrografia da figura 5.82 é apresentado o aspecto geral do rejeito da AGEO 107, com destaque para a presença significativa de partículas compostas de óxidos/hidróxido de ferro, sendo muitas delas correspondentes a partículas liberadas de hematita lamelar, carregadas para o rejeito.

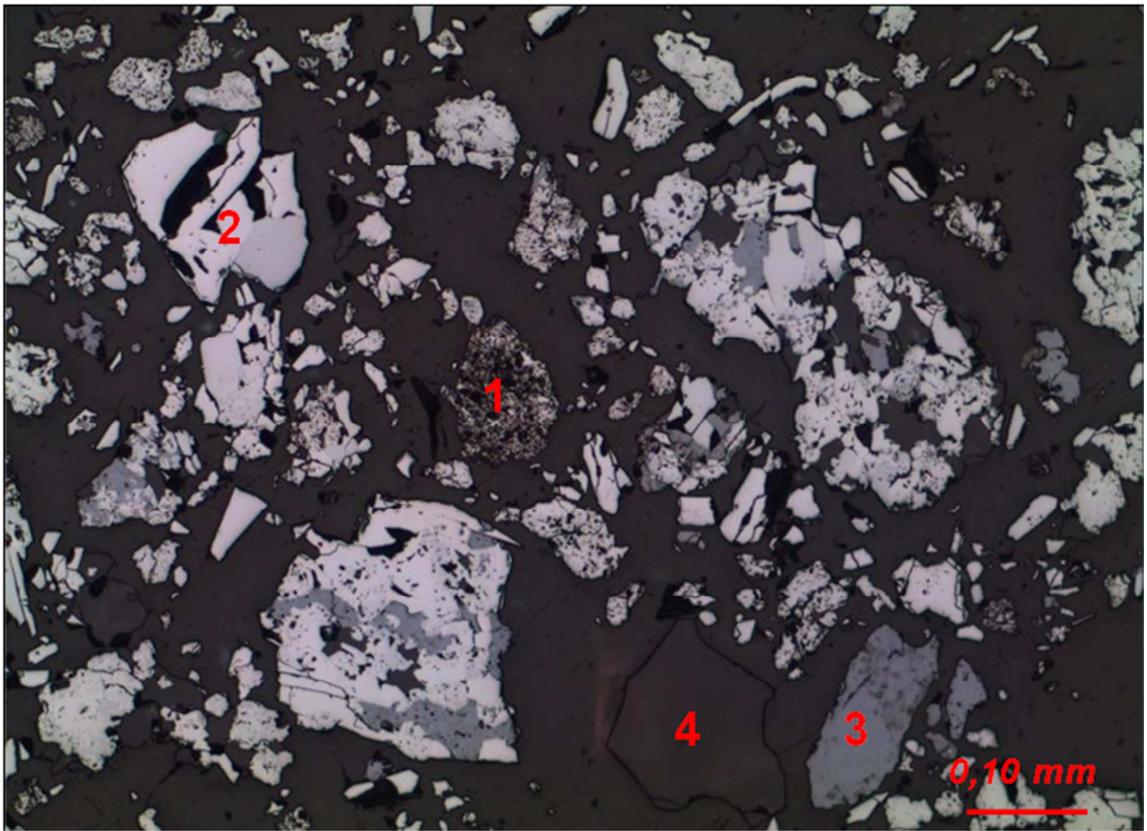


Figura 5.81 - Fotomicrografia da amostra AGEO 107 – concentrado – fração global. Aspecto geral do concentrado. 1 = Hematita martítica; 2 = hematita especular; 3 = goethita botrioidal; 4 = quartzo. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.

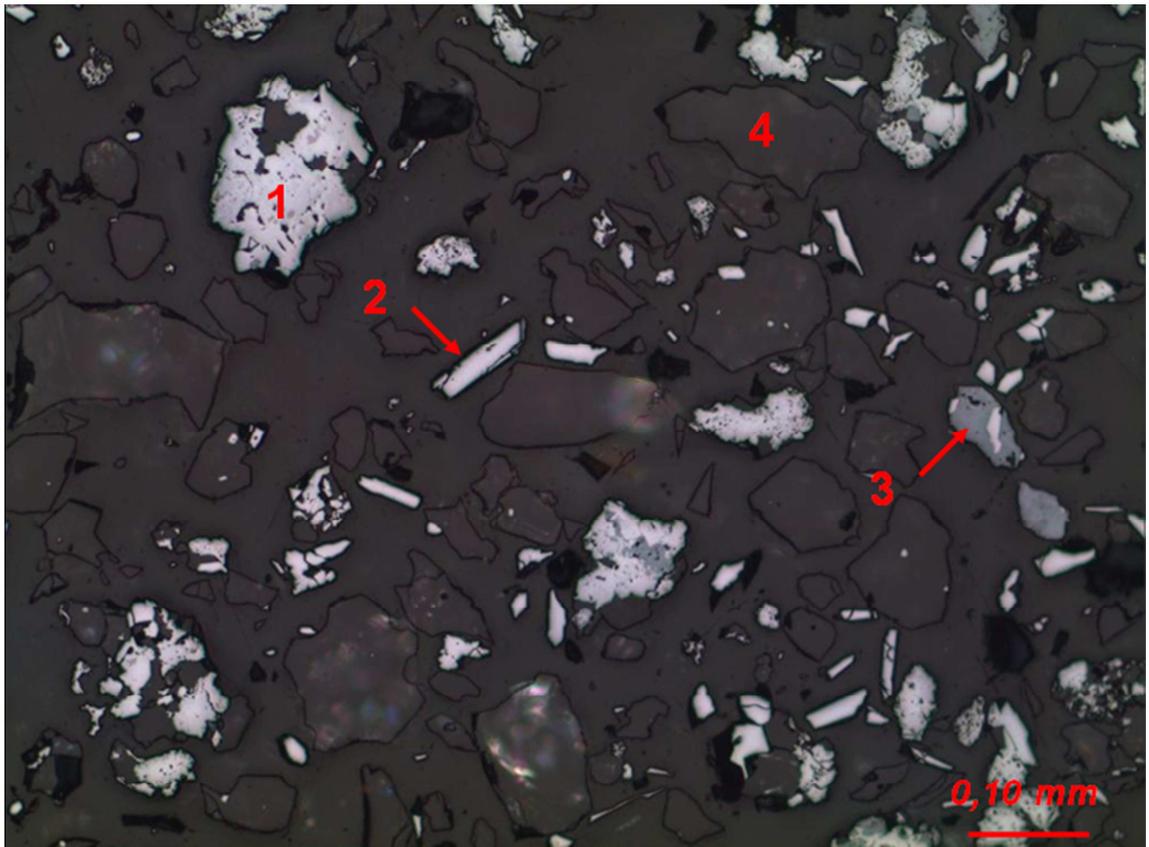


Figura 5.82 - Fotomicrografia da amostra AGE0 107 – rejeito – fração global. Aspecto geral do rejeito. 1 = Hematita martítica; 2 = hematita especular; 3 = goethita botrioidal; 4 = quartzo. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.

No caso da AGE0 91, a qualidade do concentrado obtido traiu qualquer expectativa quanto ao desempenho deste minério no processo de flotação. Com a pior qualidade dentre as amostras estudadas, é um minério que apresentou excelentes resultados pelo estudo de liberação mineral na alimentação da flotação, no entanto, algum outro fator contribuiu negativamente na seletividade do processo de flotação.

Pela figura 5.83 é possível constatar pelo posicionamento das partículas liberadas que realmente não houve boa seletividade no processo de flotação do minério da AGE0 91. No concentrado, 74% das partículas correspondem às partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro, com posicionamento dentro do esperado. Entretanto, 16% das partículas que compõe o concentrado correspondem a partículas livres de quartzo, refletindo o elevado teor de SiO_2 no concentrado.

Com relação às partículas mistas, a pequena proporção presente na alimentação da flotação do minério da AGEO 91 tendeu a posicionar-se no concentrado, devido à composição mineralógica dessas partículas predominantemente por óxidos/hidróxido de ferro, conforme demonstrado na figura 5.84. Do total de partículas mistas, 85% são compostas essencialmente por óxidos/hidróxido de ferro.

A distribuição dos tipos de partículas no rejeito retratou a baixa seletividade do processo de flotação da AGEO 91 (figura 5.83). Do total de partículas que compõe o rejeito, 56% correspondem às partículas liberadas de quartzo e 42% equivalem às partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro.

Portanto, a baixa seletividade do minério da AGEO 91, expresso pelo elevado teor de SiO_2 no concentrado e pelo elevado teor de ferro do rejeito, é evidenciado pela presença de partículas livres de quartzo no concentrado e por partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro no rejeito.

Por incrível que pareça, a fotomicrografia da figura 5.85 demonstra o aspecto geral do concentrado obtido para a AGEO 91. Destaca-se a presença expressiva de partículas liberadas de quartzo em meio às partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro, retratando mais uma vez a baixa seletividade deste minério na etapa de flotação. A fotomicrografia da figura 5.86 refere-se ao rejeito da AGEO 91, com partículas de óxidos e hidróxido liberados junto com as partículas de quartzo livre.

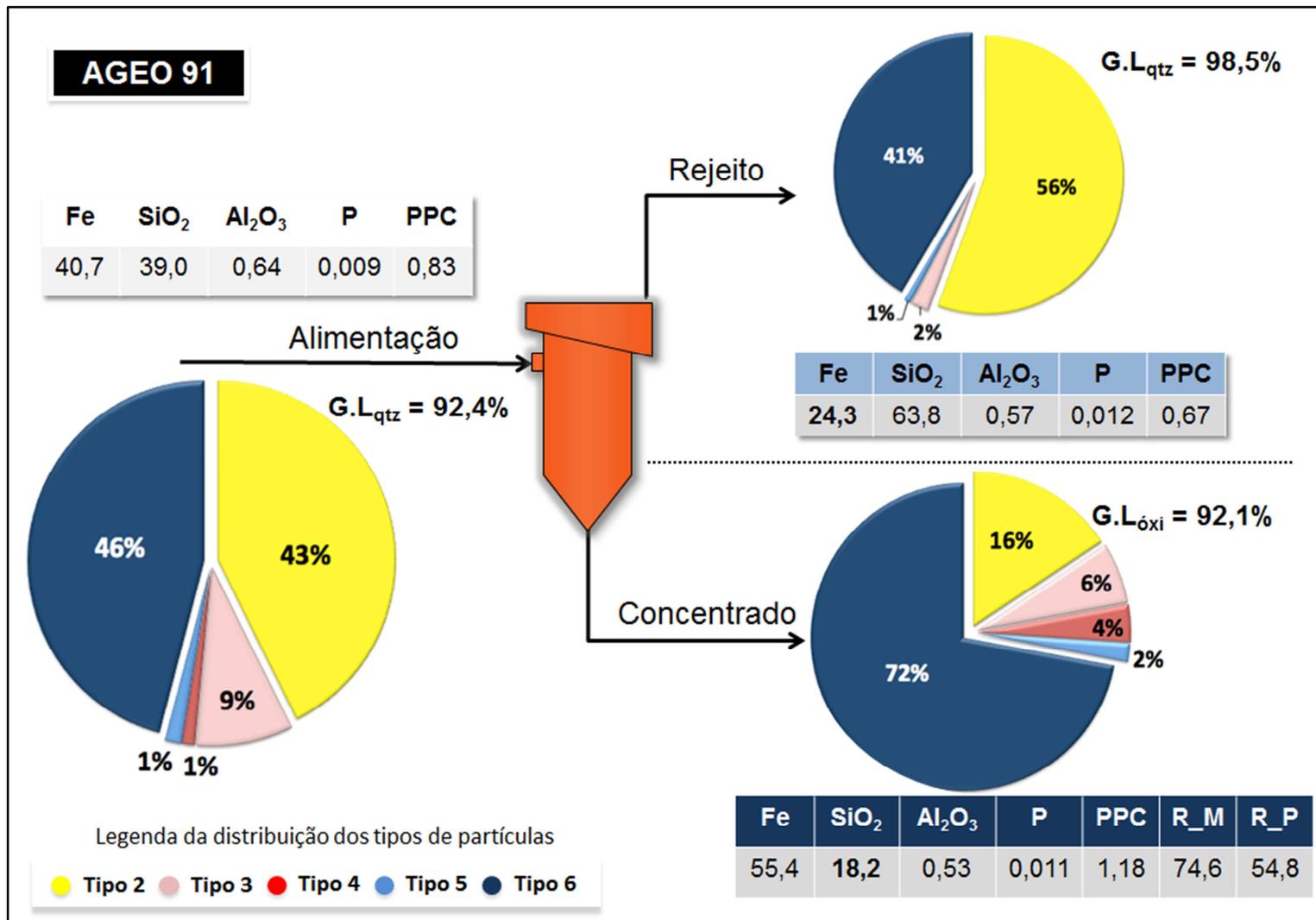


Figura 5.83 - AGEO 91: Distribuição dos tipos de partículas mistas e livres, grau de liberação do quartzo (G.L_{qtz}) e dos óxidos/hidróxido de ferro (G.L_{óxi}), qualidade química das alíquotas globais da alimentação, concentrado e rejeito da flotação.

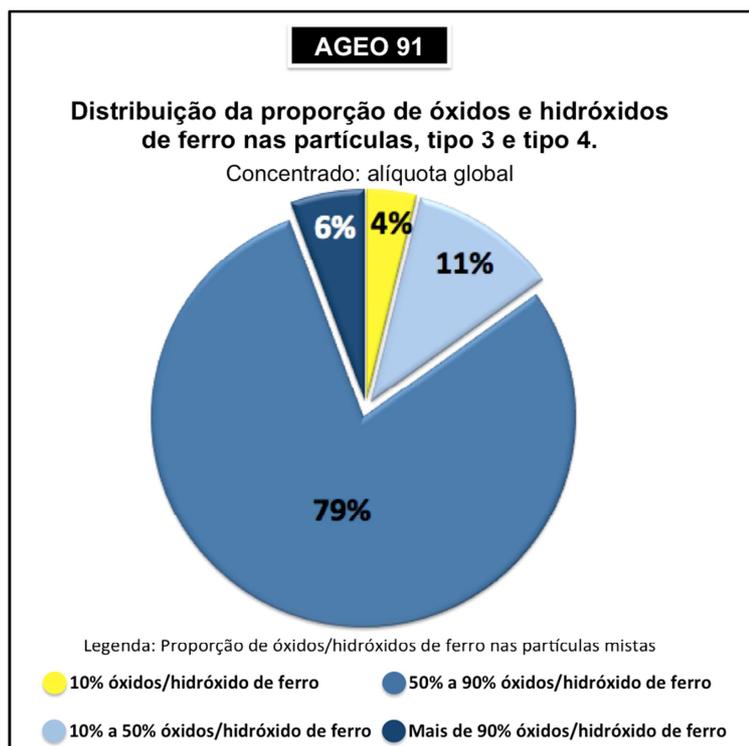


Figura 5.84 – AGEO 91: Distribuição da proporção de óxidos/hidróxido de ferro nas partículas mistas do concentrado, alíquota global.

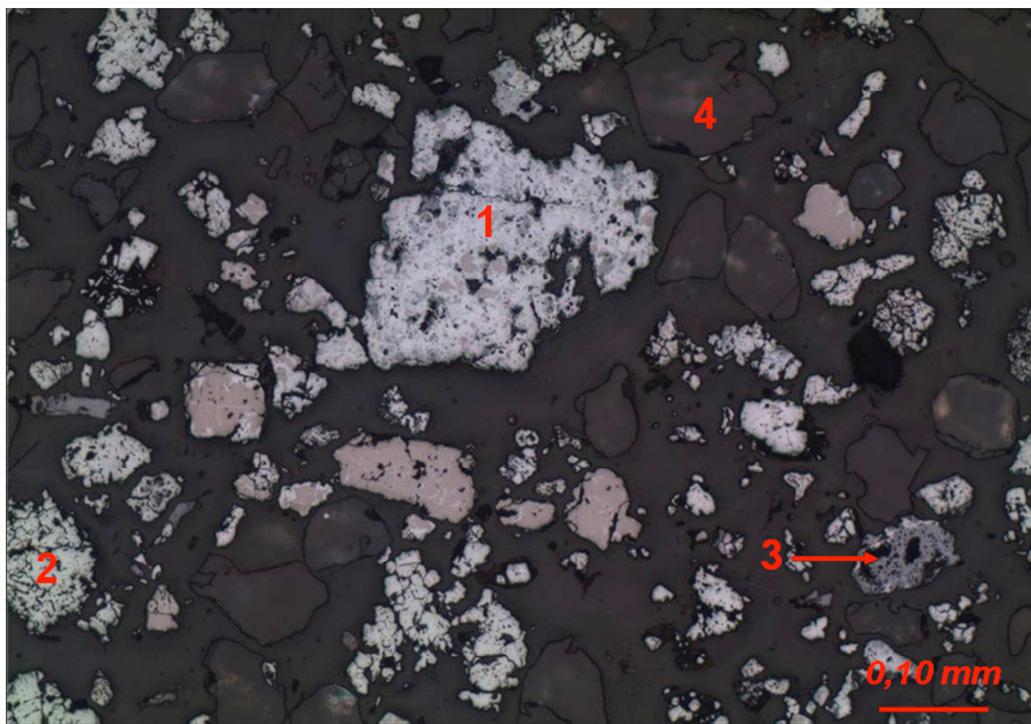


Figura 5.85 - Fotomicrografia da amostra AGEO 91 – concentrado – fração global. Aspecto geral do concentrado. 1 = magnetita martitzada + goethita botrioidal; 2 = hematita martítica; 3 = goethita botrioidal; 4 = quartzo. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.

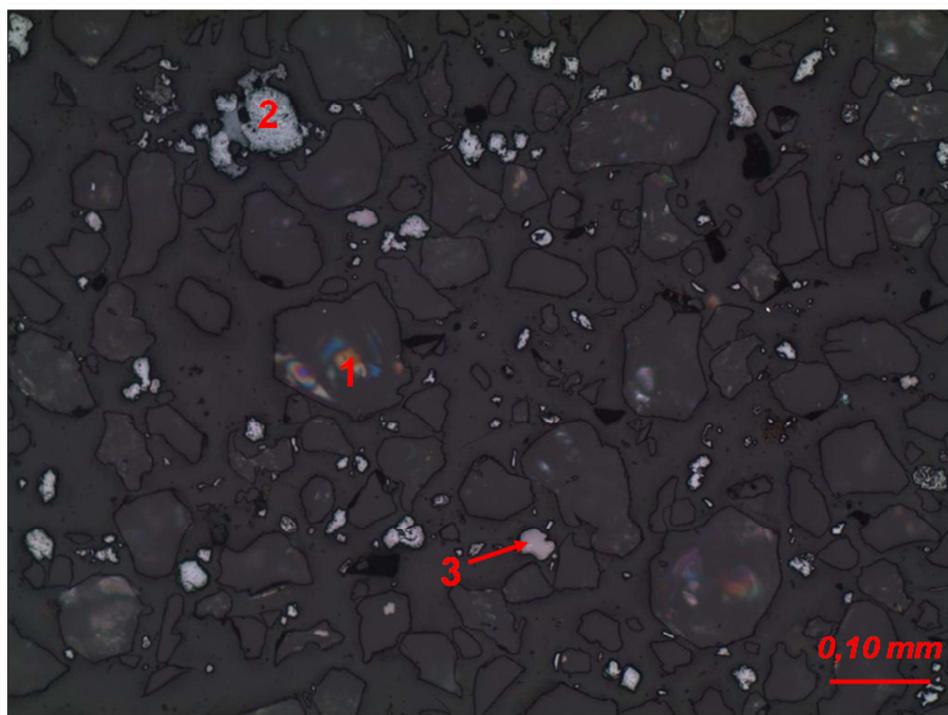


Figura 5.86 - Fotomicrografia da amostra AGEO 91 – rejeito – fração global. Aspecto geral do rejeito. 1 = quartzo; 2 = hematita martítica + goethita; 3 = magnetita. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x.

Pelo conjunto de dados apresentados e pela interpretação feita ao longo da exposição, é notável que o problema da baixa seletividade na flotação da AGEO 91 não é devido à liberação mineral.

Propõe-se que deve ser conduzido um trabalho de pesquisa específico para aprofundar o conhecimento e elucidar as questões que envolvem a baixa seletividade na flotação do minério da AGEO 91.

No entanto, diante das informações obtidas no trabalho de caracterização mineralógica do minério da AGEO 91 foi possível identificar alguns fatores que podem ter contribuído para o baixo desempenho do minério na flotação, porém, não foi possível concluir ou definir um fator determinante para a baixa seletividade deste minério.

5.7.2 Hipóteses para explicar a baixa seletividade do minério da AGEO 91

De acordo com os trabalhos de Glembotskii *et al.* (1972) e Bazin *et al.* (2001), citados por Vieira (2005), o tamanho das partículas minerais presentes na polpa é uma importante variável na sequência de eventos que levam à flotação de uma partícula. A partir de observações experimentais, concluiu-se que para cada sistema de flotação há um limite superior de tamanho de partícula flotável.

Pelo gráfico da figura 5.51, onde foram apresentadas as curvas granulométricas do quartzo e dos óxidos/hidróxido de ferro na alimentação da flotação, é possível observar que os grãos de quartzo são consideravelmente mais grossos do que os grãos de goethita e hematita/magnetita. Os grãos de quartzo apresentaram granulometria de 14,2% passante em 0,044mm (44µm) enquanto que os grãos de hematita ou magnetita apresentaram 41,8% passante nesta faixa e os de grãos de goethita 55,3%.

Apesar da fotomicrografia da figura 5.85 não ilustrar claramente, as partículas de quartzo livres posicionadas no concentrado apresentaram granulometria grossa, quando comparado aos demais minerais. Na foto da figura 5.87, obtida em uma lupa binocular, é possível perceber a quantidade de grãos de quartzo presentes no concentrado do minério da AGEO 91 e como parecem ser mais grossos.



Figura 5.87 – Aspecto geral do concentrado da AGEO 91. Lupa binocular, aumento de 80x.

O gráfico com as curvas de distribuição granulométrica dos grãos de quartzo e dos óxidos/hidróxido de ferro no concentrado (figura 5.88) confirma a percepção visual na figura 5.87 de que o quartzo apresenta granulometria mais grossa do que os grãos de óxidos/hidróxido de ferro. Apenas 5% dos grãos de quartzo foram passantes na fração 0,044mm (44 μ m) enquanto que os grãos de óxidos/hidróxido de ferro apresentaram 48% passante nesta fração.

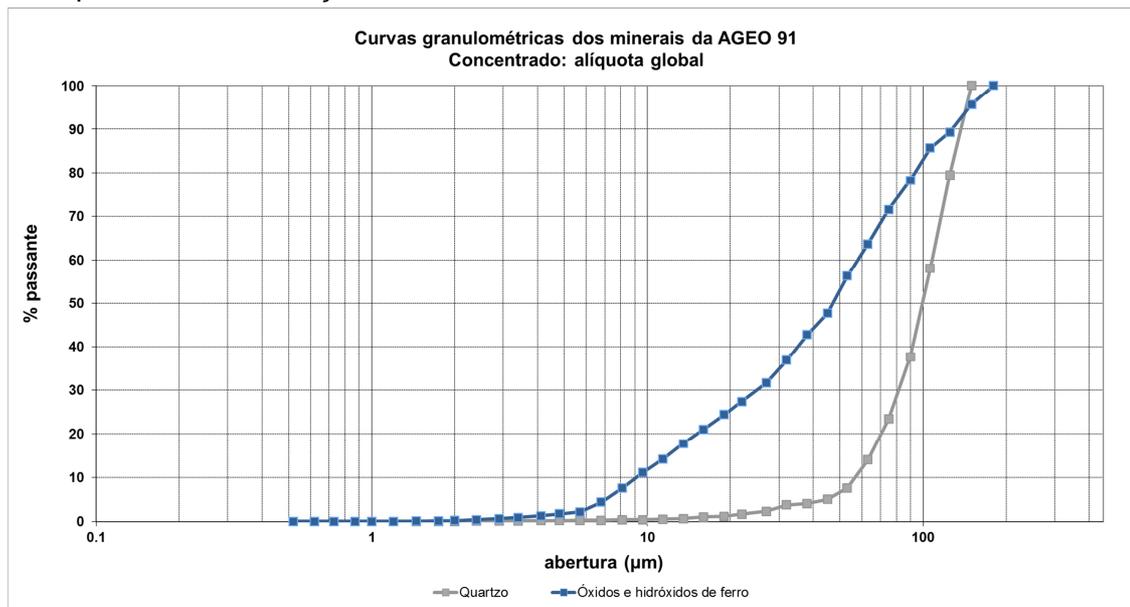


Figura 5.88 - Curva granulométrica dos grãos dos óxidos/hidróxido de ferro e dos grãos de quartzo. AGEO 91, concentrado da flotação, alíquota global. Dados obtidos no MLA.

O gráfico apresentado na figura 5.89 demonstra que o quartzo posicionado no concentrado exibiu granulometria mais grossa do que o quartzo flotado. Na fração 0,044mm (44 μ m) o quartzo do concentrado apresentou apenas 5% passante enquanto que no rejeito os grãos de quartzo apresentaram 15% passante nessa faixa. Desta forma, fica claro que, permaneceu no concentrado a fração mais grossa do quartzo.

No rejeito, os grãos de óxidos/hidróxido de ferro são consideravelmente mais finos do que grãos de quartzo. Na fração 0,044mm (44 μ m) 91,1% dos grãos de óxidos/hidróxido de ferro foram passantes enquanto que os grãos de quartzo apenas 15% estavam abaixo dessa faixa granulométrica (figura 5.90).

Pelas curvas granulométricas exibidas na figura 5.91 é possível perceber que os grãos de óxidos/hidróxido de ferro do rejeito apresentaram uma granulometria consideravelmente mais fina do que os grãos de óxidos/hidróxido de ferro que

permaneceram no concentrado. Por exemplo, na fração 0,044mm (44 μ m) os grãos de óxidos/hidróxido de ferro do rejeito apresentaram granulometria 91,1% passante enquanto que no concentrado 48% dos grãos de óxidos/hidróxido de ferro foram passantes nessa faixa granulométrica.

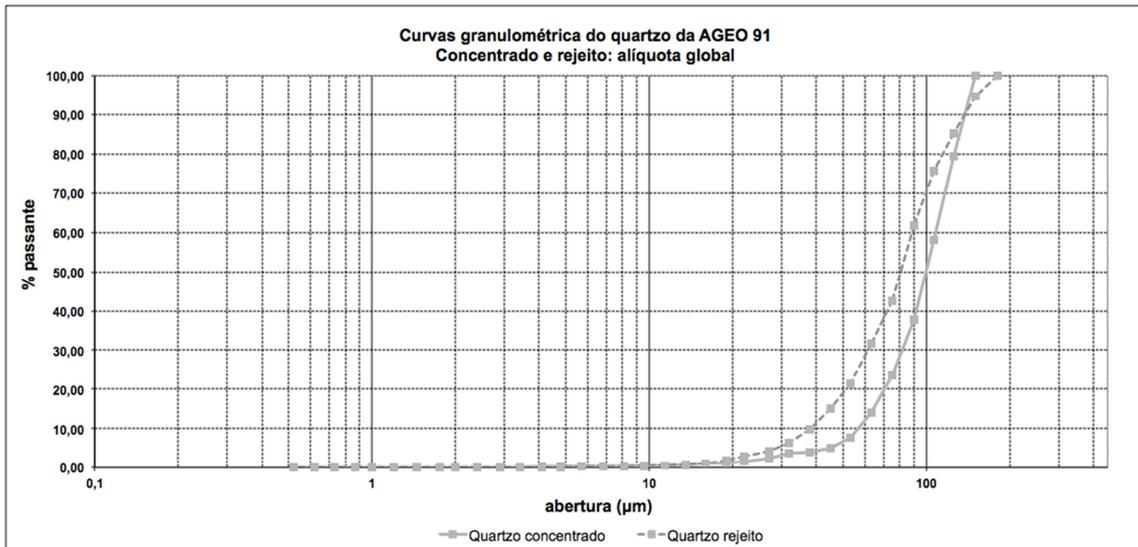


Figura 5.89 - Curva granulométrica dos grãos de quartzo da AGEO 91, concentrado e rejeito da flotação, alíquota global. Dados obtidos no MLA.

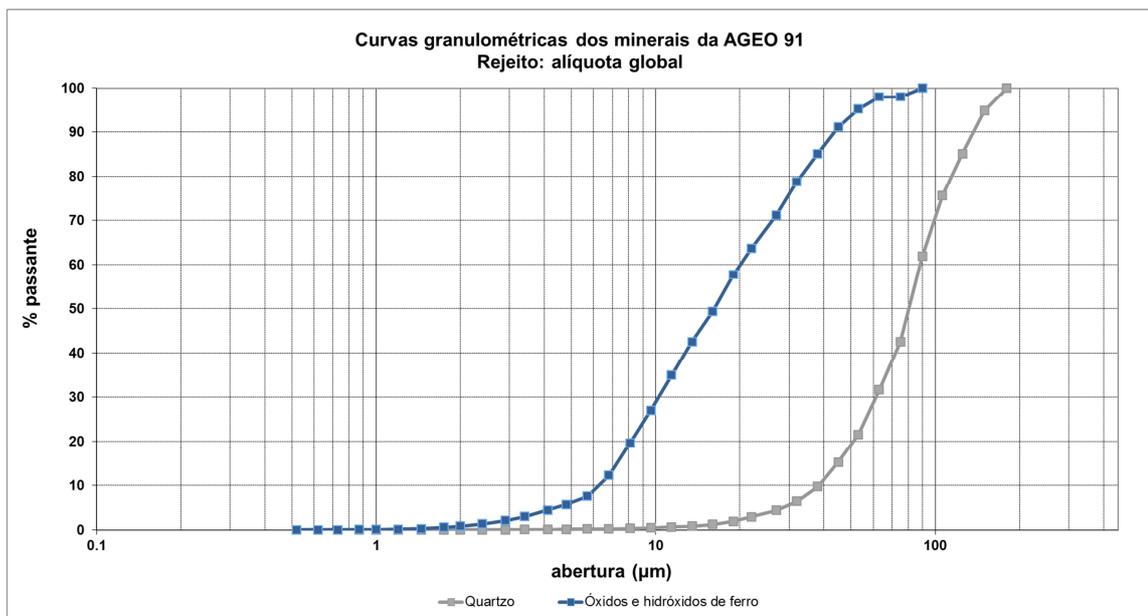


Figura 5.90 - Curva granulométrica dos grãos dos óxidos/hidróxido de ferro e dos grãos de quartzo. AGEO 91, rejeito da flotação, alíquota global. Dados obtidos no MLA.

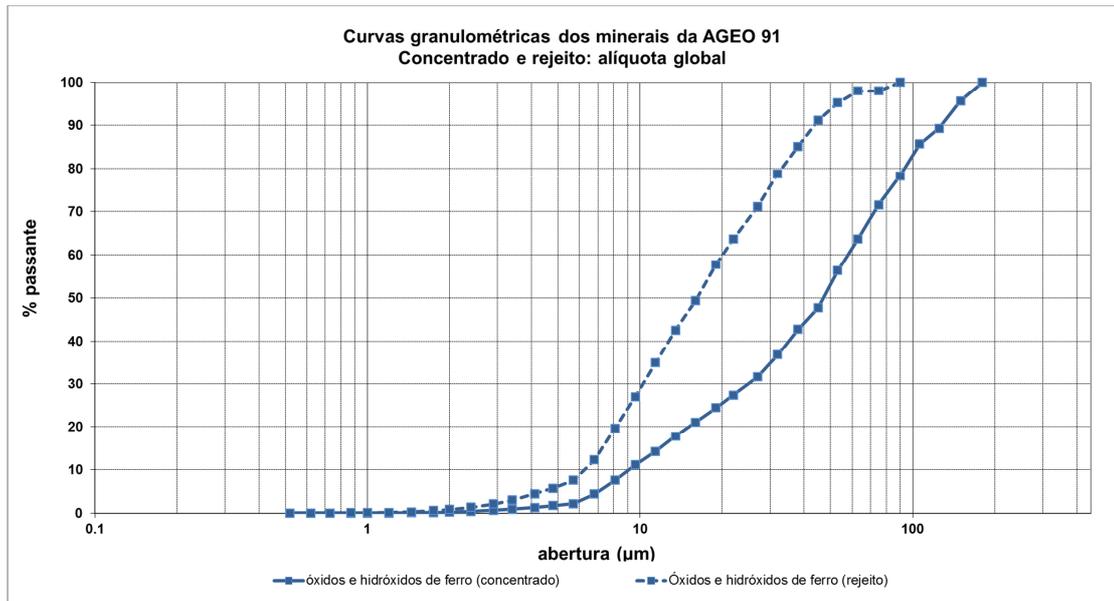


Figura 5.91 - Curva granulométrica dos grãos dos óxidos/hidróxido de ferro. AGEO 91, concentrado e rejeito da flotação, alíquota global. Dados obtidos no MLA.

Diante das curvas granulométricas das espécies minerais presentes no concentrado e no rejeito da flotação constata-se que grande proporção de grãos de quartzo com granulometria mais grossa permaneceram no concentrado enquanto que grãos extremamente finos de goethita e hematita/magnetita seguiram para o rejeito.

Vieira (2005) e Lima (2010) citaram diversos trabalhos que tratam dos efeitos do tamanho de partículas na etapa de flotação destacando a dificuldade na flotação de partículas grossas (quartzo). De acordo com os autores, as partículas grossas necessitam de maior nível de hidrofobicidade ou grau de cobertura da superfície da partícula pelo coletor, antes de se obter uma maior flotabilidade. Partículas finas requerem menor cobertura para serem flotadas do que partículas maiores.

Crawford *et al.* (1988), citados por Vieira (2005) e Lima (2010), desenvolveram um modelo para investigar a relação entre flotabilidade, tamanho de partícula e hidrofobicidade, com ensaios de flotação utilizando um tubo de Hallimond modificado e partículas de quartzo com tamanho entre 15µm e 125µm. Os resultados dos ensaios mostraram que para as partículas de tamanho de 71µm bastou apenas 35% de sua superfície fosse coberta pelas moléculas do coletor para alcançar uma recuperação de 80%. No entanto, as partículas de tamanho de 121µm tiveram que apresentar 60% de suas superfícies cobertas para alcançar a mesma recuperação. Desta forma, os

autores concluíram que há uma cobertura de superfície mínima e um ângulo de contato mínimo para cada tamanho de partícula, abaixo dos quais a flotação não acontece.

Segundo Bazin *et al.* (2001), também mencionados por Vieira (2005) e Lima (2010), partículas finas apresentam uma maior superfície específica (cm^2/g) do que as partículas grossas e por isso o consumo de coletor requerido para produzir um dado grau de cobertura é muito maior nas partículas finas do que nas partículas grossas (por unidade de massa). Desta forma, em uma polpa onde há a mistura de partículas finas e grossas, em contato com certa dosagem de coletor, grande parte será consumido rapidamente por partículas finas, sendo que na realidade necessitam de pouca cobertura para serem eficientemente flotadas. Como consequência, não haveria coletor disponível suficiente para produzir uma cobertura hidrofóbica requerida para flotar as partículas grossas.

Oliveira (2006) *apud* Lima (2010) também segue esta conceituação, atestando que é rápido e desproporcional o consumo de coletor pelas partículas finas, devido à sua maior área superficial específica, acarretando em uma menor cobertura hidrofóbica na superfície das partículas grossas, sendo menos flotáveis.

A presença expressiva de partículas liberadas de óxidos/hidróxido de ferro no rejeito também pode ser explicada pela distribuição granulométrica dos grãos de óxidos/hidróxido de ferro. De acordo com Lima *et al.* (2007), minerais de ferro com tamanho de grão muito pequeno apresentam elevada afinidade pelo coletor (elevada flotabilidade), exigindo elevadas dosagens de depressores para redução de sua tendência natural à flotação. Lima (2010), a partir dos resultados obtidos nos ensaios de flotação em diferentes frações granulométricas, constatou que a fração mais fina é mais sensível ao aumento do tempo de residência, possibilitando assim o maior arraste de partículas finas de óxidos/hidróxido de ferro para o rejeito.

O posicionamento e a distribuição granulométrica das partículas do concentrado e do rejeito da flotação são condições condizentes com os fatos mencionados anteriormente, que podem ter contribuído para a baixa seletividade na flotação do minério da AGEO 91. As partículas extremamente finas de quartzo e dos óxidos/hidróxido de ferro podem ter consumido boa parte do coletor no início do processo de condicionamento, sendo que necessitam de menor cobertura hidrofóbica para serem flotadas. Com isso, partículas ultrafinas de óxidos/hidróxido de ferro foram arrastadas para o rejeito. Como consequência, não foram produzidas cobertura

hidrofóbica necessária nos grãos mais grossos de quartzo para que essas partículas fossem flotadas.

Para avaliar a possível influência da distribuição granulométrica das partículas do minério da AGEO 91 no processo de flotação sugere-se novos estudos para verificar o comportamento de diferentes frações granulométricas no processo de flotação, considerando também a variação da dosagem de reagentes ao longo dos testes.

Outro fator que merece destaque e que está relacionado a uma característica marcante do minério da AGEO 91 podendo trazer influência relevante ao processo de flotação, é o elevado teor de Al_2O_3 . Na alíquota do ROM o teor de Al_2O_3 foi de 1,41%, muito além dos teores apresentados pelas demais amostras. Após a etapa de deslamagem o teor de Al_2O_3 na alimentação da flotação foi de 0,64%. No concentrado o teor foi de 0,53% e no rejeito o teor de Al_2O_3 foi de 0,57%.

Pela composição mineralógica apresentada no item 5.5.2 é possível constatar que o elevado teor de Al_2O_3 do minério é proveniente da caulinita e gibbsita, minerais presentes na composição mineralógica do minério da AGEO 91. Pela tabela V.17 onde são apresentados os dados obtidos pela difração de raios-X das alíquotas do minério da AGEO 91, é possível observar que esses argilominerais estão presentes tanto no concentrado como no rejeito da flotação.

As fotos exibidas na figura 5.92 ilustram como a caulinita ocorre no minério da AGEO 91. As partículas são compostas por uma matriz de caulinita envolvendo grãos subédricos a anédricos de hematita martítica.

Tabela V.17 – Resultados das análises por difração de raios-X das alíquotas de UF, Concentrado e Rejeito da AGEO 91.

Composição mineralógica (%)						
AGEO 91						
	Hematita	Goethita	Quartzo	Magnetita	Caulinita	Gibbsita
UF	45,8	8,2	37,0	7,4	1,6	Traço
Concentrado	60,0	11,5	17,0	10,2	1,3	Traço
Rejeito	29,8	2,5	58,0	4,3	1,4	4,0

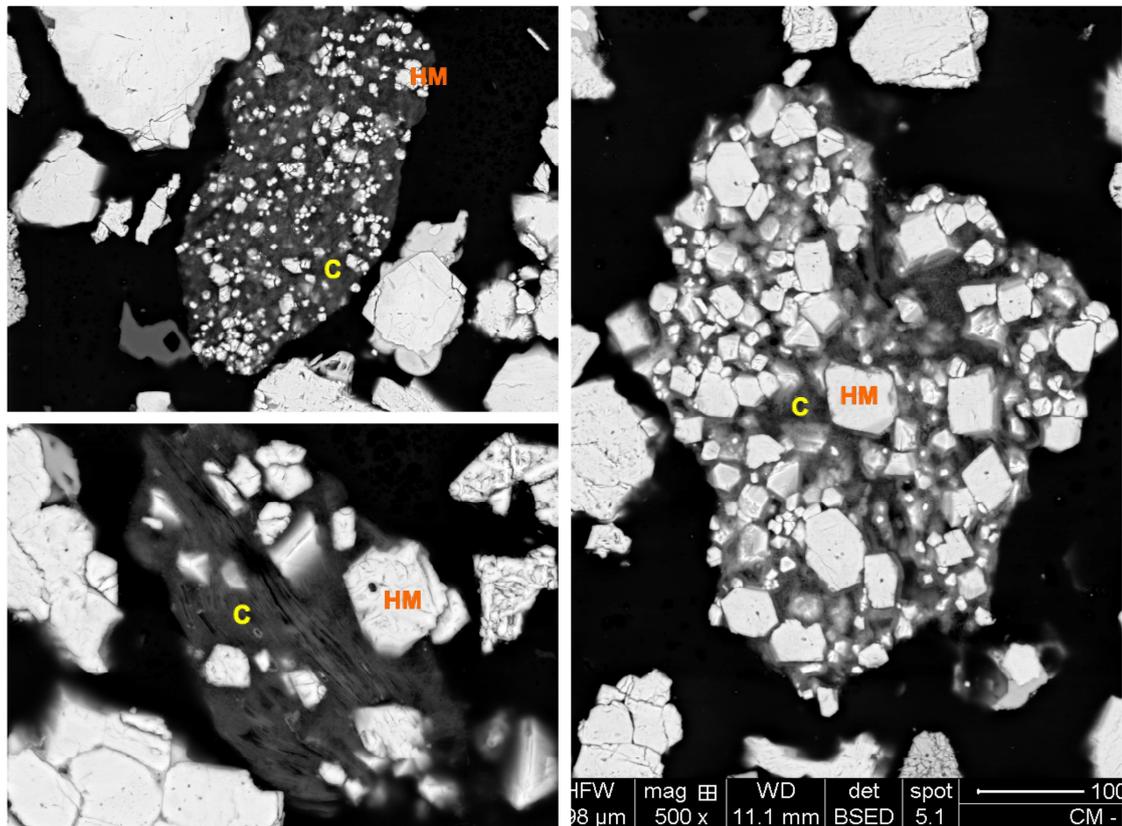


Figura 5.92 - Fotomicrografia da amostra AGE0 91 - concentrado: fração global. Partículas ricas em caulinita (c) envolvendo grãos de hematita martítica (HM). MEV-BSED.

A estrutura cristalina dos argilominerais é formada por um arranjo de tetraedros e/ou octaedros nos quais os vértices são ocupados por átomos de oxigênio e por íons hidroxila e o centro por cátions metálicos pequenos, principalmente Si^{4+} e Al^{3+} nos grupos tetraédricos e Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} e Ti^{4+} nos grupos octaédricos (Pereira, 2008).

A caulinita e a gibbsita apresentam uma camada de octaedros de alumínio coordenado por grupos de OH sendo que a caulinita também possui uma camada de tetraedros de silício coordenados por átomos de oxigênio que se ligam aos octaedros de alumínio por átomos de oxigênio comuns às duas camadas. A figura 5.93 exibe a diferença entre as estruturas dos dois minerais (Rodrigues, 2012). A gibbsita possui fórmula que pode ser expressa por $\text{Al}(\text{OH})_3$ enquanto que a fórmula estrutural da caulinita é expressa por $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$.

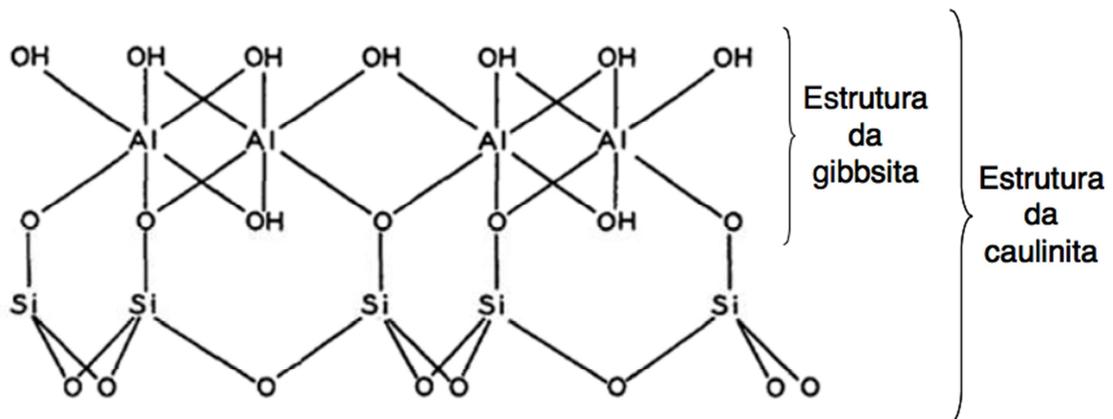


Figura 5.93 – Estrutura cristalográfica da gibbsita e da caulinita (Rodrigues, 2012).

Rodrigues *et al.* (2009) investigaram por microflotação o efeito de quatro coletores na flotação do quartzo e da caulinita. De acordo com os autores, o mesmo grupo de reagentes capazes de flotar o quartzo também flota a caulinita, porém, a cinética de flotação da caulinita é muito mais lenta do que a cinética do quartzo.

Araújo *et al.* (2003), citado por Rodrigues (2012), afirmaram que a caulinita presente no minério de ferro não tende a se concentrar no flotado ou afundado, sendo a massa da caulinita particionada de acordo com o fluxo da polpa. Este foi o caso da AGEO 91, com a presença de caulinita tanto no concentrado com no rejeito.

A presença de caulinita e gibbsita na constituição mineralógica do minério, refletindo o elevado teor de Al_2O_3 , pode causar efeitos nocivos ao processo de flotação.

Os argilominerais costumemente apresentam granulometria extremamente fina e por consequência possuem elevados valores de área superficial específica. Por exemplo, Rodrigues (2012) determinou a área superficial específica da caulinita pela isoterma de adsorção BET na alíquota da alimentação da flotação (-0,15mm) e obteve valor de $15,5 \text{ m}^2/\text{g}$ enquanto a hematita apresentou valor de $0,353 \text{ m}^2/\text{g}$.

Considerando as afirmações de Bazin *et al.* (2001) e Oliveira (2006), citados anteriormente, a caulinita, pelo elevado valor de área superficial específica, pode ter consumido boa parte do coletor no início do processo de condicionamento, juntamente com as partículas ultrafinas de quartzo e de óxidos/hidróxido de ferro. Estes fatores conjugados podem ter contribuído para dificultar a geração de cobertura hidrofóbica nos grãos mais grossos de quartzo.

Outro fator que deve ser levado em consideração no estudo da baixa seletividade do minério da AGEO 91 diz respeito a influência de íons de alumínio na etapa de flotação, presentes a partir do processo de dissolução da caulinita e da gibbsita em solução.

Pereira (2008) estudou a cinética de dissolução da caulinita e gibbsita presentes em bauxitas. De acordo com Bleam *et al.* (1993) e Huertas *et al.* (1998), citados pela autora, a caulinita contém somente Al e Si como cátions estruturais, sendo fontes para os sítios superficiais presentes nesse mineral. Desta forma, três sítios estão presentes na superfície da caulinita: sítios hidroxó-alumino (Al_2OH) externos ao plano basal, sítios hidroxó-alumino internos nas bordas do cristal e grupos silanol (SiOH). De acordo com o pH, esses sítios podem estar carregados positivamente ou negativamente. A formação de complexos carregados de diferentes naturezas, em diferentes faixas de pH, pode levar à existência de várias etapas elementares controlando a taxa de dissolução da caulinita.

Segundo Pereira (2008), diversos fatores influenciam as taxas de reação de aluminossilicatos, tais como, composição da solução, incluindo pH, afinidade química, temperatura, pressão e área superficial. Carrol-Webb e Walther (1988) e Carroll e Walther (1990), citados pela autora, estudaram a dissolução da caulinita em uma faixa de pH variando entre 1 a 12. Os autores observaram uma dissolução não estequiométrica na etapa inicial de reação, com dissolução preferencial de Al em relação a Si em $\text{pH} < 4$ e dissolução preferencial de Si em relação a Al em pH entre 4,0 e 9,3 e em seguida, dissolução inicial estequiométrica em $\text{pH} > 9,3$.

Estudos mais aprofundados com minério de ferro devem ser realizados para verificação de possível dissolução de caulinita e gibbsita na faixa de pH em que trabalha a flotação.

Araújo (1982) estudou a influência dos íons de alumínio na etapa de flotação, presentes na polpa por processo de dissolução dos argilominerais, normalmente associados aos minérios de ferro.

Primeiramente Araújo (1982) estudou a flotação do quartzo em testes de microflotação, em função do pH, na presença de três concentrações de amina. As curvas obtidas foram similares àquelas encontradas na literatura, com o pico de máxima flotabilidade do quartzo no intervalo de pH entre 10,0 e 10,5.

Em seguida, Araújo (1982) realizou uma série de testes afim de avaliar em quais valores de pH ocorrem máxima abstração de íons de alumínio pela superfície do

quartzo. De acordo com o autor, o termo abstração foi utilizado pois podem ocorrer tanto simples adsorção de íons de alumínio como também precipitação de hidróxidos formados em solução.

Pelos dados obtidos, o autor afirma que existe abstração de íons de alumínio pela superfície do quartzo entre a faixa de pH de 3,5 a 10,0, sendo que a máxima abstração acontece entre os valores de 7,0 e 8,5 de pH.

Para estudar a influência dos íons de alumínio na flotação do quartzo, Araújo (1982) realizou testes de microflotação com concentrações fixas de amina e de íons de alumínio na faixa de pH entre 3 e 10. Pelos resultados obtidos foi possível constatar que houve queda expressiva da flotação do quartzo, principalmente na faixa de pH de máxima abstração dos íons de alumínio pela superfície do quartzo, em pH 7,5. Pelo gráfico da figura 5.94 é possível observar que em pH 10,0 a flotabilidade do quartzo na presença de íons de alumínio foi próximo a 50%, sendo que no mesmo gráfico é possível perceber que a flotação do quartzo é de 100% sem a presença de íons de alumínio.

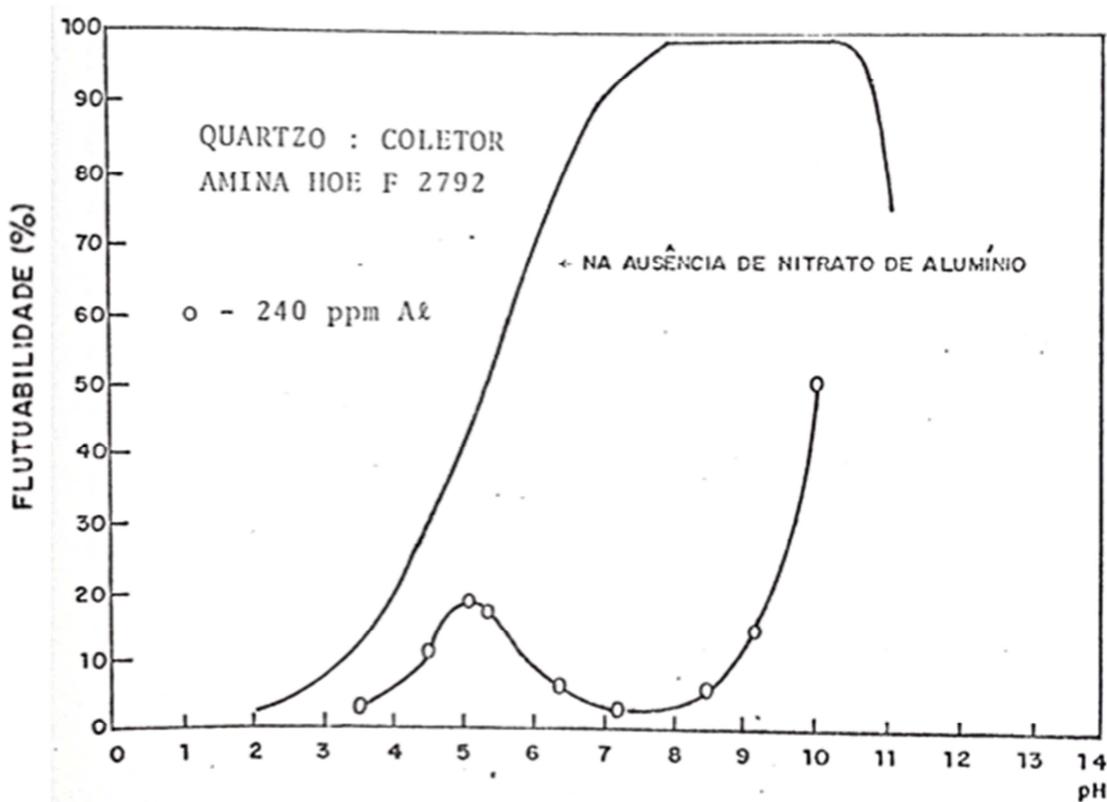


Figura 5.94 – Influência dos íons de alumínio na flotabilidade do quartzo, em função do pH. (Araújo, 1982).

No entanto, outro ensaio realizado pelo autor mostra que em pH 10,0 o aumento da concentração de amina pode restabelecer a flotação do quartzo. Segundo Araújo (1982), pelos resultados de abstração e pelas curvas de potencial zeta do quartzo na presença de íons de alumínio, pode-se admitir que a queda na flotação do quartzo está associada provavelmente com a mudança de sinal e de módulo de carga líquida de superfície. Em pH 10,0 a flotabilidade pode ser totalmente restabelecida com aumento da concentração do coletor, uma vez que o potencial zeta nesse pH é negativo mais de menor módulo se comparado ao módulo do potencial zeta do quartzo em pH 10,0 na ausência de íons de alumínio.

Em continuidade ao estudo, Araújo (1982) realizou testes para avaliar a influência dos íons de alumínio na flotação do quartzo com a presença de amina e de amido de milho na solução. O amido de milho é normalmente empregado nos sistemas hematita-quartzo com objetivo de deprimir seletivamente os óxidos/hidróxido de ferro, uma vez que o amido é preferencialmente adsorvido na hematita em relação ao quartzo. Pelo gráfico da figura 5.95 é possível observar que a adição de íons de alumínio ao sistema com pequenas dosagens de amido de milho provoca total queda na flotação do quartzo, em pH 10. Segundo o autor, uma possível explicação seria que, admitindo-se as ligações de hidrogênio com as principais forças responsáveis pela adsorção do amido e que a repulsão eletrostática contribui para a diminuição da adsorção, a presença de espécies de alumínio adsorvidas na superfície do quartzo favorece a adsorção de amido, tanto no sentido de aumentar a disponibilidade de sítios para ligações de hidrogênio como para diminuir a repulsão eletrostática. Deste modo, os grãos de quartzo não teriam uma cobertura hidrofóbica necessária para serem flotados.

Todos estes fatores mencionados anteriormente podem ter afetado o desempenho do minério da AGEO 91 na etapa de flotação. Novos estudos devem ser realizados para verificar se essas condições colocadas agem separadamente ou se a baixa seletividade é produto do conjunto de fatores atuando concomitantemente.

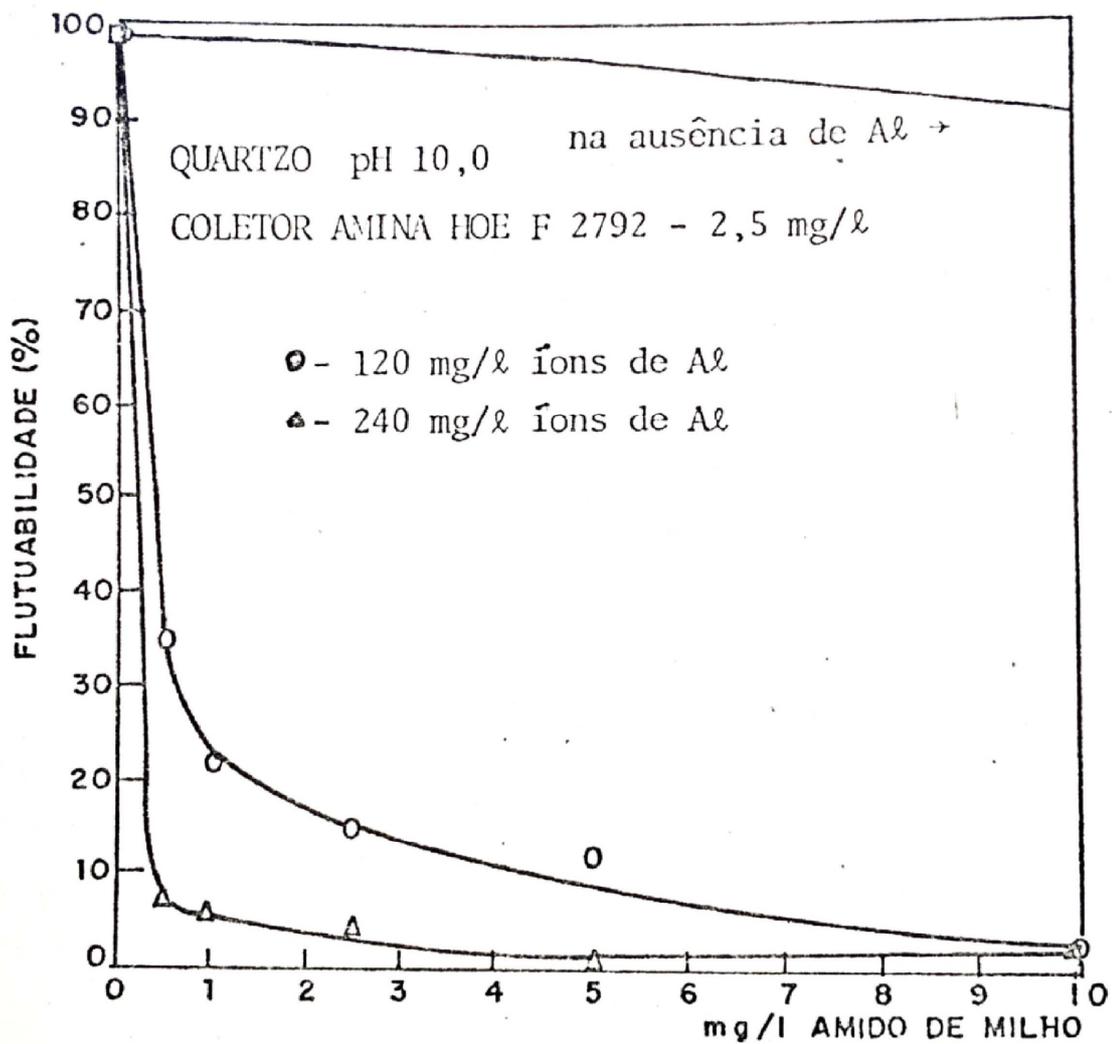


Figura 5.95 – Ação conjunta de íons de alumínio e amido de milho na flutuabilidade do quartzo, em pH 10. (Araújo, 1982).

6. CONCLUSÕES

1. Os resultados obtidos no ensaio de requerimento energético de moagem remete à dureza do minério e traduz o comportamento do minério na etapa de moagem. Os minérios friáveis apresentaram menores valores de requerimento energético de moagem do que os minérios semicompactos e compacto. Dentre os minérios semicompactos, o itabirito anfíbolítico-martítico exibiu maior valor de requerimento energético do que o itabirito especularítico-martítico.
2. Na moagem ocorreu aumento do grau de liberação do quartzo e diminuição da proporção das partículas mistas com o aumento do grau de cominuição, principalmente para os minérios semicompactos e compacto. No entanto, os valores de grau de liberação do quartzo ainda permaneceram baixos e a proporção de partículas mistas elevada após o término da moagem;
3. Na alimentação da flotação, os minérios friáveis apresentaram maiores valores de grau de liberação do quartzo e melhor distribuição dos tipos de partículas livres e mistas do que os minérios semicompactos e compacto;
4. As condições desfavoráveis de liberação mineral dos minérios das AGEO 72, AGEO 77 e AGEO 107 influenciaram no processo de flotação, prejudicando a obtenção de teor baixo de sílica no concentrado e índices otimizados de recuperação metálica;
5. O estudo aprofundado da liberação mineral na caracterização mineralógica das alíquotas da alimentação da flotação forneceu informações que permitem prever o comportamento do respectivo minério na etapa de flotação, observando as tendências de posicionamento das partículas mistas no concentrado ou rejeito da flotação;
6. A composição mineralógica obtida na caracterização no MLA corroborou os resultados fornecidos pela análise no MLR;
7. O MLA se mostrou uma técnica eficiente e totalmente aplicável ao estudo do grau de liberação de minérios de ferro. A grande quantidade de informações disponibilizadas, diante de um rápido processamento, com grande representatividade estatística e excelente assertividade, são algumas das principais vantagens do MLA. Complementado pela caracterização mineralógica via MLR, torna-se uma técnica essencial para qualquer trabalho de caracterização que se faça.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar caracterização mineralógica com foco no grau de liberação das espécies minerais de diferentes tipos de itabiritos, utilizando técnicas complementares como MLR e MLA, para estudar o processo de obtenção da liberação mineral na etapa de remoagem e avaliar o posicionamento das partículas livres e mistas em um segundo estágio de flotação.

Estudar blendagens considerando os mais diversificados tipos de minérios de ferro para compreender o efeito da mistura de minérios com diferentes condições de liberação mineral na etapa de flotação.

Aprofundar a caracterização mineralógica e tecnológica do minério da AGEO 91 para esclarecer os motivos pela baixa seletividade deste minério na etapa de flotação.

Buscar modelo de previsibilidade do teor de SiO_2 do concentrado em função dos dados da distribuição dos tipos de partículas livres e mistas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, F. F. & MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29-58. 1998.

ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7: 349-364. 1977.

ARAÚJO, A. C. Influência de íons de alumínio e caulinita na flotação catiônica do quartzo e hematita. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1983. 121p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas)

BATISTELLI, G. M. B. Amina residual na flotação catiônica reversa de minério de ferro. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 118p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

BERALDO, J.L. Moagem de minérios em moinhos tubulares. São Paulo, Editora Edgar Blücher, 143p., 1987.

BOND, F.C. The Third Theory of Comminution: *AIME Transactions*, Vol. 193, 1952.

BRANDÃO, P. R. G. Curso Métodos de Instrumentação e Análise. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2012 (Notas de Aula).

BRANDÃO, P.R.G., ROCHA, J. M. P., CANÇADO, R. Z. L. Minérios de ferro goethíticos do Quadrilátero Ferrífero (Brasil) – caracterização com ênfase nas impurezas principais. In: *Memórias e Notícias de Geociências no Espaço Lusófono*, Volume 1: Para Conhecer a Terra, Imprensa da Universidade de Coimbra, Portugal, 2012, p. 299-308.

BRYN, L. M. Página dinâmica para aprendizado do sensoriamento remoto. Porto Alegre: Centro de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, 2008. 153p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Desenvolvimento de Metodologias em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento).

CARIOCA, A. C. Caracterização microestrutural e mineralógica de minérios de ferro itabiríticos com graus diferentes de complexidade. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 170p. (Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

CARNEIRO, M. A., NOCE, C. A., TEIXEIRA, W., Evolução policíclica do Quadrilátero Ferrífero: uma análise fundamentada no conhecimento atual da geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Sm-Nd. REM. 48, pp. 264-273. 1995.

CASTRO, E. F. Produção de pellet feed a partir de lamas. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 92p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

CHAGAS, T. T. R., A moabilidade na moagem secundária de pellet-feeds de minérios de ferro em função da mineralogia, química e microestrutura. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 2008. 74p. (Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, Caracterização de Materiais).

CHAVES, A. P., PERES, A.E.C. Teoria e prática de tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem, volume 3. São Paulo, Signus Editora, p. 425-662, 2009.

CHEMALE Jr., F., QUADE, H., SANTANA, F. C. Economic and Structural Geology of the Itabira Iron District, Minas Gerais, Brazil. Zbl. Geol. Paläontol., VI (7/8): p. 743-752, 1987.

CHEMALE Jr., ROSIÈRE, C. A., ENDO, I. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero: um modelo. UFRGS. Pesquisas, v. 18, n 2, p. 104-127. 1991.

COSTA, A. G. D. Caracterização dos parâmetros intrínsecos de porosidade pelo método de adsorção de nitrogênio de concentrados remoídos de minérios itabiríticos do Complexo Alegria. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 2005. 124p. (Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT).

COSTA, A. G. D., ROCHA, J. M. P., BONFIOLI, L., VIEIRA, C. B. A Importância do modelamento geológico-tipológico no controle de qualidade dos concentrados e pelotas de minério de ferro da Samarco Mineração S/A. In: XXIX Seminário de Redução de Minério de Ferro, 24, 1998, Belo Horizonte – MG. p. 545-555.

DELBEM, I. D. Processamento e análise digital de imagens aplicados aos estudos de liberação mineral. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. 99p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

DELBEM, I. D. Caracterização automatizada de minérios de ferro via microscopia ótica de luz refletida. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 121p. (Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Tecnologia Mineral).

DONDA, J. D. Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinho de bolas. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2003. 124p. (Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

DONDA, J. D., ROSA, A. C. A Lei da Moagem – Comprovação para o minério de ferro. Ed. 1. Ouro Preto: L&E Graphar, 2014.

DORR, J. V. N. Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, vol 59, N° 7, p. 1203-1240, november, 1964.

DORR, J. V. N. Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. In: *Professional Paper*, Washington, USGS/DNPM, 641 – A, 110p. 1969.

ESCHWEGE, W. L. v. *Pluto Brasiliensis*. Berlin: Verlag G. Reimer, 1833.

FERREIRA, R. F. Estudo de liberação das fases minerais em minérios de ferro. Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 2013. 210p. (Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Tratamento de Minérios).

FERREIRA, R. F., MARQUES, M. L. S., SILVA, R. G., SANTOS, G. F., PEREIRA, E. C. Relação entre o grau de metamorfismo e deformação e as características que influenciam na definição da malha de moagem de minérios de ferro. In: *Anais do 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro*, 2011. 9p.

GAUDIN, A. M. *Principles of mineral dressing*. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1939.

GONÇALVES, T. A. R. Técnicas de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura automatizada (QEMSCAN) e análise de imagens aplicadas a diferentes . Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1997. 263p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

GUILD, P. W. Geology and mineral resources of the Congonhas District, Minas Gerais. U.S. Geol. Survey, Professional Paper 290: 90p. 1957.

HASUI, Y. et al., Mina de Alegria (Porção Ocidental). Parte I - Tipologia dos Constituintes da Jazida de Ferro. Geociências, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 101-119, 1994.

HERBST, J.A., RAJAMANI, R.K., MULAR, A.L., FLINTOFF, B. Mineral Processing Plant Design, Practice and Control, Published by Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Chapter – Circuit Simulators: An Overview, pp. 383, 2002.

JAMES, H. L. Sedimentary facies of iron formation. Economic Geology, vol 99, p. 235 – 293. 1954.

JAMES, H. L. Distribution of banded iron formation in space and time In: Trendall, A. F. and Morris, R. C. (Editors), Banded Iron Formation: Facts and Problems. Amsterdam, Elsevier. p. 471-490, 1983.

JANUZZI, A., ALKMIM, F. F. Geologia estrutural da Mina de Alegria (Samitri) Município de Mariana, MG. 1989. 13p. (Relatório Interno Samitri).

LAGOEIRO, L. Transformation of magnetite to hematite and its influence on the dissolution of iron oxide minerals. Journal of Metamorphic Geology, 1998. Vol. 16, p. 415-423.

LIMA, N.P. Avaliação do processo de flotação para diferentes frações granulométricas. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. 160p. (Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

LIMA, N.P.; FERREIRA, A.D.; LEAL FILHO, L.S.; MARTINS, M. Depressão de minerais de ferro: influência da mineralogia, morfologia e pH de condicionamento. In: Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, ABM, Salvador, Bahia, Brasil, Setembro, 2007.

MACHADO, N., NOCE, C. M., BELO de OLIVEIRA, O. A., LADEIRA, E. A. Evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero no Arqueano e Proterozóico Inferior, com base na geocronologia U-Pb. In: V Simp. Geol. Minas Gerais, SBG, Anais, 1: 1-5.

MANTILLA, E. R. Avaliação da liberação mineral por análise de imagens digitais obtidas em microscópio ótico de luz refletida. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2013. 115p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Tecnologia Mineral).

MAPA, P. S. Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração S.A. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. 190p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

MAZZINGHY, D. B. Modelagem e simulação de circuito de moagem através da determinação dos parâmetros de quebra e da energia específica de fragmentação. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 128p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

MENDES, M. C. O. Microestruturas e texturas cristalográficas em policristais de hematita como indicadores da magnitude de deformação no Quadrilátero Ferrífero. Ouro Preto: Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2011. 87p. (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais).

MORRIS, R. C. Genesis of iron ore in banded iron-formation by supergene and surpergene-metamorphic processes – a conceptual model. In: Handbook of Stratabound and Stratiform Ore Deposits. Netherlands: Elsevier Science Publishers' B. V., 1985. Vol. 13, cap. 2, p.73-235.

NEUMANN, R., SCHNEIDER, C. L., NETO, A. A. Caracterização Tecnológica de minérios Parte II. In: LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de minério, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, 5ª edição. Capítulo 3, p. 85-139. Rio de Janeiro, 2010.

NOCE, C. M. Geochronology of the Quadrilátero Ferrífero: a review. In: Geonomos, 8 (1): 15-23. 1998.

PEREIRA, J.A.M. Estudo da cinética de dissolução da gibbsita e da caulinita presentes em bauxitas. Rio de Janeiro: Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. 248p. (Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Engenharia Química).

PEREIRA, L. M. M. Metodologia aplicada aos trabalhos de microscopia de minério de ferro. 2009. 53p. (Relatório Intero da Open Brasil).

PERES, A. E. C. et al. Métodos de concentração. In: VALADÃO, G. E. S. (Org.); ARAUJO, A. C. (Org.). Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. Cap. 6, p. 105-139.

PORPHÍRIO, N.H., BARBOSA, M.I., BERTOLINO, L.C. Caracterização Tecnológica de Minérios Parte I. In LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de Minérios, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, 5ª Edição, capítulo 3, p. 57-84. Rio de Janeiro, 2010.

PRYOR, E.J. Mineral processing. 3th ed. New York: Elsevier, 1965.

RABELO, P. J. B. Estudos de caracterização e redução do teor de fósforo do minério de ferro da Mina de Alegria, Mariana, MG. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1994. 304p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

RIBEIRO, D. T. Enriquecimento supergênico de formações ferríferas bandadas: estruturas de colapso e desordem. Rio de Janeiro: Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003. 123p. (Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia).

RIBEIRO, M. R. Investigação das características dos minérios de ferro da CVRD que influenciam seu comportamento na moagem. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 2004. 97p. (Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, Processos de Fabricação).

ROCHA, J.M.P. Caracterização mineralógica de minérios goethíticos-limoníticos da mina de Alegria, M.G. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1997. 263p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

ROCHA, J.M.P. Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfíbolíticos das minas de Alegria da Samarco Mineração S.A – Minas Gerais. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. 346p. (Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

ROCHA, J. M. P., BRANDÃO, P. R. G. Goethitas da mina de Alegria, MG: ênfase na cristalinidade e na hidroxilação. In: I Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro: Caracterização, Beneficiamento e Pelotização, Ouro Preto, 1996, Associação Brasileira Metalurgia e Materiais (ABM), p. 383-402.

ROCHA, J. M. P., BRANDÃO, P.R.G., CANÇADO, R. Z. L. Characterisation of the amphibolitic itabirites of the Alegria mines, Minas Gerais, Brazil. In: Proceedings, Geomin 2011 – 2nd. International Seminar on Geology for the Mining Industry, Antofagasta, Chile, p. 1-10.

ROCHA, J. M. P., BRANDÃO, P.R.G., CANÇADO, R. Z. L. Microestruturas de minerais de ferro típicos de itabiritos anfíbolíticos alterados do Quadrilátero Ferrífero (Brasil). In: Memórias e Notícias de Geociências no Espaço Lusófono, Volume 1: Para Conhecer a Terra, Imprensa da Universidade de Coimbra, Portugal, 2012, p. 309-319.

ROCHA, J. M. P., BRANDÃO, P.R.G., CHISTE, J. P. Origem da goethita fibrosa dos itabiritos anfíbolíticos das minas de Alegria – Samarco Mineração S. A. In: Anais do 10º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, Ouro Preto, MG. Associação Brasileira Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), São Paulo, p. 1-12. 2009.

RODRIGUES, O. M. S. Flotação da caulinita em minérios de ferro e bauxítico. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 170p. (Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

RODRIGUES, O. M. S.; MARTINS, L. V. F.; VIANA, P. R. M.; ARAÚJO, A.C. Investigação da cinética de flotação de caulinita e do quartzo e sua implicação na flotação reversa de minérios de ferro. In: Anais do 64º Congresso da ABM, 2009. Belo Horizonte, MG, Brasil.

RODRIGUES, R. S., BONFIOLI, L. E., MAPA, P. S., PINTO, L. A. Desenvolvimento de um modelo matemático para determinação do requerimento de energia de moagem da reserva de minério de ferro da Samarco Mineração S. A. In: Anais do 44º Seminário de

Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 15º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 2014. p. 388-400.

ROSA, A. C. Desempenhos dos circuitos de moagem direto e inverso da Samarco. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013. 132p. (Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Engenharia Mineral).

ROSIÈRE, C. A., CHEMALE Jr. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do quadrilátero ferrífero – uma visão geral e discussão. 2000. Geonomos, 8 (2): 27-43.

ROSIÈRE, C. A., CHEMALE Jr., F., GUIMARÃES, V. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte 1: estruturas e recristalização. 1993. Geonomos, 1 (1): 65-84.

ROSIÈRE, C. A., RIOS, F. J. The origin of hematite in high-grade ores based on infrared microscopy and fluid inclusion studies: the example of Conceição Mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. Economic Geologists, 2004. Vol. 99, p. 611-624.

ROSIÈRE, C. A., SPIER, C. A., RIOS, F. J., SUCKAU, V. E. The itabirites of the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade iron ore deposits: an overview. Society of Economic Geologists Reviews, 2008. vol. 15, p. 223-254.

ROWLAND JR, C. A. The Tools of Power: the Bond Work Index, a tool to measure grinding efficiency. In: Selection Circuits to Prepare Beneficiation Feeds. Allis Chalmers Bulletin, 1983.

SAMARCO MINERAÇÃO S.A. Relatório Anual de Sustentabilidade. 2013.

SANDMANN, D. Method development in automated mineralogy. Freiberg: Von der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. 2015. 152p

SANTOS, L.D. Caracterização microestrutural de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero – MG. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2002. 178p. (Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

SCURI, A. E. Filtros interativos para imagens digitais no domínio da frequência. Rio de Janeiro: Departamento de Informática da Pontifícia Universidade Católica do Rio de

Janeiro, 1994. 48p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Computação Gráfica).

SILVA, C. C. A influência das características microestruturais de minérios de ferro em suas moagens. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2003. 100p. (Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

SOUZA, A. A. P. Caracterização mineralógica de minério de ferro da Serra do Sapo, MG: aplicação da técnica Mineral Liberation Analyser - MLA. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 121p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociência, Geologia Econômica e Aplicada).

SOUZA JÚNIOR, M. Caracterização mineralógica e tecnológica do minério de ferro itabirítico anfíbolítico da jazida de Alegria, Mariana, MG. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1994. 208p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

STAMBOLIADIS, E. T. The evolution of a mineral liberation model by the repetition of a simple random breakage pattern. *Minerals Engineering*, Chania, v. 21, 3rd ed., p. 213-223, 2007.

TAGGART, A. *Handbook of Mineral Dressing*. John Wiley and Sons, 1945.

TOLEDO, M. C. M., OLIVEIRA, S. M. B., MELFI, A. Intemperismo e formação do solo. in: TEIXEIRA, W., TOLEDO, M. C. M., FAIRCHILD, T. R., TAIOLI, F. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficinas de Textos, 2000. Capítulo 8, p. 140-166.

TURRER, H. D. G. Polímeros depressores na flotação de minério de ferro. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 174p. (Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

UILIANA, A., DONDA, J. D., ROCHA, J. M. P., RODRIGUES, R. S. Caracterização de itabiritos compactos da mina de Alegria – Samarco Mineração (Parte 1). In: *Anais do 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking*, 2012. 12p.

VERÍSSIMO, C. U. V. Jazida de Alegria: Gênese e tipologia dos minérios de ferro; Minas 3,4 e 5 – Porção Ocidental. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências

Exatas da Universidade Estadual Paulista, 1999. 2vol. (Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geociências , Área de Concentração em Geologia Regional).

VIEIRA, A.M. Efeito da granulometria na flotação do quartzo. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 166p. (Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

VIEIRA, M. G. Produção de um pellet feed a partir da concentração do rejeito da flotação mecânica da SAMARCO. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. 90p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

VIEIRA, M. G. Efeitos da reologia de polpa e avaliação de dispersantes como aditivos de moagem na remoagem de um concentrado de minério de ferro. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2011. 151p. (Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

von KRÜGER, F. L. Corpos moedores côncavos. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. 135p. (Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Tecnologia Mineral).

WILLS, B.A. Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 7th ed. Oxford: Elsevier, 2007.

ANEXOS

ANEXO 1

**Comparação do resultado da análise química da alíquota global
com o resultado ponderado da granulométrica**

Amostras: AGEO 72, AGEO 77, AGEO 88, AGEO 91 e AGEO 107

ALIMENTAÇÃO DA FLOTAÇÃO

Amostra	Fração	quantidade (g)	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO ₂	PPC	FeO
AGEO 72	+0,15mm	18	46,7	27,2	0,21	0,079	0,026	5,51	0,6
	+0,15mm -0,075mm	57	37,3	42,8	0,16	0,052	0,017	3,54	0,7
	-0,075mm +0,044mm	43	33,0	49,8	0,16	0,041	0,012	2,64	0,6
	-0,044mm	53	39,2	40,6	0,19	0,047	0,015	2,96	0,7
	Global Teórico	171	37,8	42,2	0,17	0,051	0,016	3,34	0,7
	Global analisado		38,4	41,4	0,18	0,049	0,020	3,29	0,5
AGEO 77	+0,15mm	15	37,4	43,8	0,05	0,013	0,062	2,56	2,0
	+0,15mm -0,075mm	38	32,8	51,0	0,05	0,015	0,011	2,01	1,2
	-0,075mm +0,044mm	27	31,4	53,2	0,05	0,014	0,01	1,74	1,0
	-0,044mm	39	35,5	47,2	0,07	0,014	0,014	1,79	1,5
	Global Teórico	119	34,0	49,3	0,06	0,014	0,018	1,95	1,4
	Global analisado		33,9	49,4	0,05	0,014	0,015	1,98	1,5
AGEO 88	+0,15mm	22	41,3	37,0	0,13	0,026	0,053	3,71	1,2
	+0,15mm -0,075mm	73	36,6	44,9	0,12	0,018	0,042	2,63	1,1
	-0,075mm +0,044mm	44	47,1	30,0	0,14	0,018	0,039	2,51	0,9
	-0,044mm	56	60,3	10,5	0,16	0,023	0,034	3,09	1,1
	Global Teórico	195	46,3	30,7	0,14	0,020	0,040	2,86	1,1
	Global analisado		46,3	30,5	0,15	0,018	0,100	2,53	1,0
AGEO 91	+0,15mm	18	38,9	42,0	0,54	0,018	0,011	1,67	2,6
	+0,15mm -0,075mm	58	28,7	57,5	0,46	0,01	0,01	0,91	2,2
	-0,075mm +0,044mm	43	35,7	47,4	0,48	0,01	0,01	0,89	2,3
	-0,044mm	64	53,9	20,9	0,74	0,011	0,01	1,1	2,7
	Global Teórico	183	40,2	40,8	0,57	0,011	0,010	1,05	2,4
	Global analisado		40,7	39,0	0,64	0,009	0,100	0,83	2,3
AGEO 107	+0,15mm	18	44,5	34,1	0,12	0,058	0,029	1,98	0,4
	+0,15mm -0,075mm	61	28,9	57,6	0,09	0,032	0,019	0,9	0,4
	-0,075mm +0,044mm	45	36,1	47,5	0,09	0,025	0,015	0,64	0,5
	-0,044mm	63	53,9	22,1	0,11	0,029	0,014	0,7	0,5
	Global Teórico	187	40,5	40,9	0,10	0,032	0,017	0,87	0,5
	Global analisado		39,8	40,4	0,11	0,028	0,100	0,93	0,5

ANEXO 2

**Resultados das análises por difração de raios-X das alíquotas
globais de UF, Concentrado e Rejeito**

Amostras: AGEO 72, AGEO 77, AGEO 88, AGEO 91 e AGEO 107

Alimentação da Flotação (UF)

AMOSTRA	hematita	goethita	quartzo	magnetita	caulinita	gibbsita	SOMA
AGEO 72	25,0	32,3	41,0	1,7	traço	traço	100,0
AGEO 77	26,2	19,6	49,4	4,8	traço	traço	100,0
AGEO 88	40,5	24,8	30,4	3,3	traço	1,0	100,0
AGEO 91	45,8	8,2	37,0	7,4	1,6	traço	100,0
AGEO 107	49,2	9,2	40,1	1,5	traço	traço	100,0

Concentrado

AMOSTRA	hematita	goethita	quartzo	magnetita	caulinita	gibbsita	SOMA
AGEO 72	42,0	51,0	3,2	2,8	1,0	traço	100,0
AGEO 77	47,0	31,3	13,9	7,8	traço	traço	100,0
AGEO 88	53,0	41,8	1,0	4,2	traço	traço	100,0
AGEO 91	60,0	11,5	17,0	10,2	1,3	traço	100,0
AGEO 107	77,6	17,0	3,1	2,3	traço	traço	100,0

Rejeito

AMOSTRA	hematita	goethita	quartzo	magnetita	caulinita	gibbsita	SOMA
AGEO 72	9,3	20,7	67,9	2,1	traço	traço	100,0
AGEO 77	17,0	17,4	62,1	3,5	traço	traço	100,0
AGEO 88	13,8	5,4	78,8	2,0	traço	traço	100,0
AGEO 91	29,8	2,5	58,0	4,3	1,4	4,0	100,0
AGEO 107	36,8	5,2	56,3	1,7	traço	traço	100,0

ANEXO 3

**Resultados das análises mineralógicas (volume parcial) via
MLR das alíquotas globais do concentrado**

Amostras: AGEO 72, AGEO 77, AGEO 88, AGEO 91 e AGEO 107

AMOSTRA	HE	HM	G	MA
AGEO 72	5,8	35,9	55,3	3,1
AGEO 77	1,1	45,8	42,9	10,2
AGEO 88	18,9	31,1	46,3	3,7
AGEO 91	0,7	71,3	17,2	10,8
AGEO 107	61,3	18,8	19,0	0,9