

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

Ronildo da Costa Soeiro

**ANÁLISE TEÓRICA DE UM CIRCUITO DE MOAGEM REVERSA ATRAVÉS DA
UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE MODSIMTM**

Belo Horizonte

2024

Ronildo da Costa Soeiro

**ANÁLISE TEÓRICA DE UM CIRCUITO DE MOAGEM REVERSA ATRAVÉS DA
UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE MODSIMTM**

Artigo apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) como requisito para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientador: Professor Dr. Luiz Cláudio Monteiro Montenegro

Belo Horizonte

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

UFMG

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO RONILDO DA COSTA SOEIRO

Realizou-se, no dia 29 de abril de 2024, às 10:00 horas, na plataforma MS TEAMS da Universidade Federal de Minas a defesa da Monografia intitulada "ANÁLISE TEÓRICA DE UM CIRCUITO DE MOAGEM REVERSA ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE MODSIM™", apresentada por ronildo da costa soeiro, número de registro 2021697473, graduado em engenharia DE PRODUÇÃO, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS, à seguinte Comissão Examinadora: Professor Luiz Claudio Monteiro Montenegro- Orientador, Professor Leonardo Junior Fernandes Campos (Universidade Federal de Minas Gerais), Professora Geriane Macêdo Rocha (Universidade Federal de Minas Gerais).

A comissão considerou a defesa da monografia:

Aprovada

Reprovada

Nota: 83

Finalizando os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 29 de abril de 2024.

gov.br Documento assinado digitalmente
LUIZ CLAUDIO MONTEIRO MONTENEGRO
Data: 06/06/2024 09:18:05-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Risia Magriolis Pappini
Coordenadora do Curso de Especialização
em Engenharia de Recursos Minerais

Professor Luiz Claudio Monteiro Montenegro (Doutora)

gov.br Documento assinado digitalmente
LEONARDO JUNIOR FERNANDES CAMPOS
Data: 06/06/2024 09:25:00-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Risia Magriolis Pappini
Secretaria do Curso de Especialização
em Engenharia de Recursos Minerais

Professor Leonardo Junior Fernandes Campos (Doutor)

gov.br Documento assinado digitalmente
GERIANE MACEDO ROCHA
Data: 06/06/2024 09:44:39-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Professora Geriane Macêdo Rocha (Doutora)

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi elaborado com a coautoria do senhor Tiago Henrique Coelho Pires, a quem agradeço a grande dedicação.

À Mineração Morro do Ipê por todo suporte oferecido à elaboração deste trabalho.

À minha esposa, Aline Vidal Vasconcelos, pelo apoio na elaboração desse trabalho.

RESUMO

A Mineração Morro do Ipê está operacionalizando seu novo projeto Tico Tico e, esse está na fase de *ramp up*. Nessa fase, os equipamentos vão tendo sua alimentação aumentada, gradativamente, de acordo com o plano operacional. Durante esse período testes são realizados para verificar o quão aderente a operação e processo do circuito/equipamentos está ao projeto. O circuito de tratamento de minério de ferro do projeto Tico Tico possui um circuito de moagem e classificação reversos (alimenta-se primeiramente a classificação, onde a alimentação do moinho é o *underflow* dessa classificação), o que não é usual para beneficiamento de minério de ferro. Portanto, devido ao fato de não se ter dados históricos relativos a esse processo para entendimento e definição de possíveis ações mitigadoras, foi necessário o uso de um sistema de simulação. A simulação gera cenários e, com eles pode-se sugerir formas de trabalhar as variáveis do processo para melhor controle da operação. Pode-se citar variáveis importantes como densidade de polpa, teores de elementos principais do minério, granulometria, bWi (*Bond Work Index*), dureza, entre outras para alimentar esse sistema de simulação. Realizou-se através do uso do software de modelamento e simulação *ModSim*™. Foram escolhidos 4 cenários de alimentação nova da usina para serem simulados, levando em consideração as variações dos teores de ferro e sílica presentes no plano de lavra da mina. Para esta análise, foi escolhido modelo de moinho HFSU implementado no *ModSim*™. Os parâmetros de classificação foram determinados através do módulo *CurveFit* do *ModSim*™. A partir dos resultados da simulação verificou-se que a medida com há o empobrecimento da alimentação nova da usina (aumento do teor de SiO₂ e redução do teor de Fe), aumenta-se a carga circulante do circuito, as granulometrias dos fluxos de alimentação, *underflow* e *overflow* dos ciclones de classificação. Para o processo como um todo, o aumento da quantidade de partículas acima de 150 mm, torna-se o processo de flotação e obtenção da qualidade do produto final mais difícil, tornando-se a principal variável a ser observada nas simulações realizadas. Portanto, este trabalho teve como objetivo, a avaliação do circuito de moagem reversa adotado no projeto Tico Tico, pertencente a empresa Mineração Morro do Ipê, avaliando e comparando os resultados gerados para cada cenário em relação ao que foi especificado pelo projeto.

Palavras-chave: simulação; moagem; classificação; minério de ferro; hidrociclone.

ABSTRACT

Mineração Morro do Ipê is operationalizing its new Tico Tico project and this is in the ramp up phase. In this phase, the equipment's power supply is gradually increased, in accordance with the operational plan. During this period tests are carried out to verify how adherent the operation and process of the circuit/equipment is to the project. The iron ore treatment circuit of the Tico Tico project has a reverse grinding and classification circuit (the classification is fed first, where the mill feed is the underflow of this classification), which is unusual for iron ore processing. Therefore, due to the lack of historical data relating to this process to understand and define possible mitigating actions, it was necessary to use a simulation system. The simulation generates scenarios and, with them, it is possible to suggest ways of working with the process variables to better control the operation. Important variables such as pulp density, content of the main elements of the ore, grain size, bWI (Bond Work Index), hardness, among others, can be mentioned to feed this simulation system. It was carried out using the modeling and simulation software ModSimTM. Four new power plant scenarios were chosen to be simulated, taking into account variations in iron and silica content present in the mine's mining plan. For this analysis, the HFSU mill model implemented in ModSimTM was chosen. Classification parameters were determined using the CurveFit module of ModSimTM. From the simulation results it was verified that as there is an impoverishment of the plant's new feed (increase in the SiO₂ content and reduction in the amount of Fe), the circulating load of the circuit increases, the particle sizes of the feed flows, underflow and overflow of classification cyclones. For the process as a whole, the increase in the quantity of particles above 150 mm makes the flotation process and obtaining the quality of the final product more difficult, becoming the main variable to be observed in the simulations carried out. Therefore, this work aimed to evaluate the reverse grinding circuit adopted in the Tico Tico project, belonging to the company Mineração Morro do Ipê, evaluating and comparing the results generated for each scenario in relation to what was specified by the project.

Keywords: *simulation; milling; classification; iron ore; hydrocyclone.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma de processos do projeto Tico Tico, empresa Mineração Morro do Ipê, (Mineração Morro do Ipê, 2023).	10
Figura 2 - Circuito com moagem reversa na empresa Mineração Morro do Ipê, (Mineração Morro do Ipê, 2023).	11
Figura 3 – Escala Vickers de dureza de alguns tipos de minerais (Magotteaux, 2023)	12
Figura 4 - Partículas mistas e partículas liberadas após processo de moagem, (Luz, 2010) [3].	13
Figura 5 - Esquematização de circuito com processo de moagem direta (Elaborado pelo autor, 2024).	14
Figura 6 - Esquematização de circuito com processo de moagem reversa (Elaborado pelo autor, 2024).	14
Figura 7 - Esquematização do funcionamento de um Hidrociclone (AKW, 2018) [5].	15
Figura 8 - Curva Granulométrica Classificação Circuito de Moagem Projeto Tico Tico (Mineração Morro do Ipê, 2023).	17
Figura 9 - Fluxograma de processo com balanço de massa do circuito de moagem reversa adotada no projeto Tico Tico (Elaborado pelo autor).	18
Figura 10 - Mapeamento de furos de sondagens realizados pela empresa (Mineração Morro do Ipê, 2016).	19
Figura 11 - Mapeamento geológico da mina Tico Tico (Mineração Morro do Ipê, 2023).	20
Figura 12 - Fluxograma de processo com balanço simulado para Cenário 1 (Elaborado pelo autor).	22
Figura 13 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 1 (Elaborado pelo autor).	22
Figura 14 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 1 (Elaborado pelo autor).	23
Figura 15 - Fluxograma de processo com balanço simulado para Cenário 2 (Elaborado pelo autor).	24
Figura 16 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 2 (Elaborado pelo autor).	24
Figura 17 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 2 (Elaborado pelo autor).	25
Figura 18 - Fluxograma de processo com balanço simulado para Cenário 3, (Elaborado pelo autor).	26
Figura 19 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 3, (Elaborado pelo autor).	26
Figura 20 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 3, (Elaborado pelo autor).	27
Figura 21 - Fluxograma de processo com balanço simulado para Cenário 4 (Elaborado pelo autor).	28
Figura 22 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 4 (Elaborado pelo autor).	28
Figura 23 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 4 (Elaborado pelo autor).	29
Figura 24 - Curvas Granulométricas Simuladas Sobrepostas Cenários-Alimentação Classificação (Elaborado pelo autor).	30
Figura 25 - Curvas Granulométricas Simuladas Sobrepostas Cenários-Underflow Classificação (Elaborado pelo autor).	31
Figura 26 - Curvas Granulométricas Simuladas Sobrepostas Cenários – Overflow Classificação (Elaborado pelo autor).	31

Figura 27 – Comparativo A80, P80 e Alimentação total Classificação (Elaborado pelo autor).	32
Figura 28 – Comparativo fator de redução de moagem e carga circulante (Elaborado pelo autor).....	33
Figura 29 – Comparativo do bWi simulado para cada um dos cenários (Elaborado pelo autor).	34
Figura 30 – Comparativo %Fe, %SiO ₂ , +150 mm, -150 +10 mm e -10 mm (Elaborado pelo autor).....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de referência para o teste de índice de trabalho WI Bond, (Lamartine, 2024).....	13
Tabela 2 - Resultados Processo Produto da Moagem e Classificação, (Mineração Morro do ipê, 2023).....	18
Tabela 3 - Método de caracterização litológica, (Mineração Morro do ipê, 2023).....	19
Tabela 4 - Cenários usados para simulação no <i>ModSim</i> TM, (Elaborado pelo autor).....	20
Tabela 5 - Cenários usados para simulação no <i>ModSim</i> TM, (Elaborado pelo autor).....	21
Tabela 6 - Resultados Parâmetros Processo Gerados Simulados para Cenário 1, (Elaborado pelo autor).....	23
Tabela 7 - Resultados Parâmetros Processo Gerados Simulados para Cenário 2, (Elaborado pelo autor).....	25
Tabela 8 - Resultados Parâmetros Processo Gerados Simulados para Cenário 3, (Elaborado pelo autor).....	27
Tabela 9 - Resultados Parâmetros Processo Gerados Simulados para Cenário 4, (Elaborado pelo autor).....	29
Tabela 10 - Resultados Parâmetros Processo Gerados Simulados para os Cenário, (Elaborado pelo autor).....	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO.....	12
3	DESENVOLVIMENTO.....	16
4	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	21
5	ANÁLISE E RESULTADOS.....	30
6	SUGESTÃO ESTUDO FUTURO	36
7	CONCLUSÃO.....	36
	REFERÊNCIAS	38



Figura 2 - Circuito com moagem reversa na empresa Mineração Morro do Ipê, (Mineração Morro do Ipê, 2023).

Com os imprevistos e dificuldades durante as fases de planejamento de lavra, nem sempre é possível realizar o desmonte de rocha de acordo com o que é esperado. Por esse motivo, pode-se causar transtornos para as instalações de beneficiamento mineral durante as etapas de britagem, cominuição e concentração. Em algumas instalações, estes processos foram projetados ou parametrizados para o recebimento de uma alimentação em que se atende um determinado tipo de especificação. Pode-se citar como exemplo os teores de contaminantes na alimentação de uma usina e a compactabilidade deste material.

Todavia, devido a essas dificuldades onde em alguns casos não existem alternativas que possam contornar essas situações, se faz necessário a utilização de métodos que possam auxiliar em tomadas de decisão. Um dos principais métodos de auxílio de tomada de decisão, que possibilita a antecipação de resultados, trata-se de simulações realizadas por softwares, onde é possível o desenvolvimento de dados por modelamento matemático através da entrada de dados reais.

A partir do fato acima, foi realizada uma análise do circuito de moagem reverso adotado no projeto Tico Tico, sendo necessária a antecipação dos possíveis diferentes cenários que podem impactar o circuito de moagem.

Esta análise terá como base, as variações dos teores de sílica e ferro presentes na massa de *run of mine* [ROM] que será empregada na alimentação deste circuito de moagem. Esta avaliação, será realizada por meio da utilização do software de simulação *ModSim*TM, p mantendo fixos os parâmetros operacionais de projeto nestes equipamentos, sendo eles: a pressão de entrada na alimentação dos hidrociclones Krebs modelo GMAX26 (0,70 kgf/cm²), os tamanhos do *inlet* (60 polegadas²), *apex* (6 polegadas) e *vortex finder* (12 polegadas), para o moinho grau de enchimento de 35%, consumo de potência líquida 8.600 kwh, velocidade crítica de 75%, corpos moedores 3 polegadas, dimensão do equipamento 20 x 39, *work index* do minério de 10,73 kwh/t em 106 μ m, e um consumo de energia específica de 7,3 Kwh/t para um P80 de 95 μ m.

Foram gerados 4 cenários, somados ao cenário do projeto de engenharia, para serem analisados e comparados os principais parâmetros de alimentação e overflow dos hidrocilones de classificação e da moagem, bem como apresentar impactos, por análise sensitiva, nos processos de deslamagem e flotação.

2 REVISÃO

A alimentação de qualquer planta de beneficiamento depende totalmente da tipologia de rochas/minério. Os itabiritos presentes na mina de propriedade da Mineração Morro do Ipê são classificados com friáveis, semi-compactos e compactos. Os minérios de ferro têm composição majoritária de minerais de ferro e de quartzo. Toda planta de beneficiamento é projetada mediante os teores de ferro e quartzo e, características mineralógicas que a alimentam para definição da rota de processo. Para os processos de moagem e hidrociclonagem, a determinação das fases mineralógicas são importantes, pois as propriedades físicas de cada tipologia interferem diretamente na eficiência de cada uma dessas etapas, por exemplo: os minerais de ferro são mais densos e menos competentes que os de quartzo. Por exemplo, na moagem, teoricamente, quanto mais quartzo maior a resistência a cominuição (figura 3), necessitando assim de uma maior quantidade de energia necessária para reduzir o material para que 80% passe na malha de interesse, dado em kWh/t. Os testes de Bond demonstraram que quanto maior o bWi mais difícil se torna a moagem conforme tabela 1.

Escala Vickers de Dureza

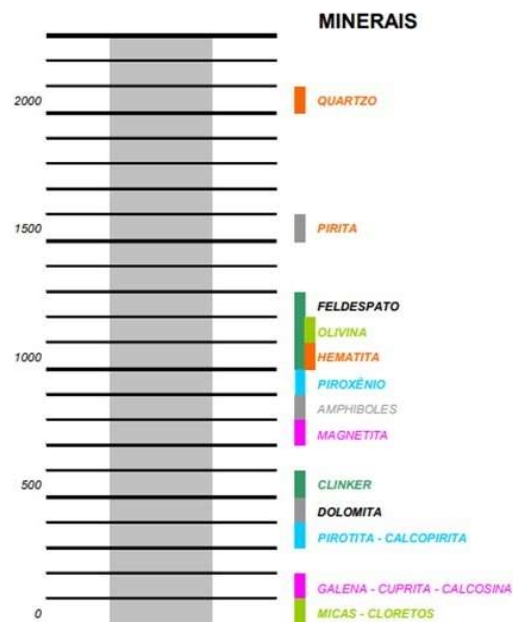


Figura 3 – Escala Vickers de dureza de alguns tipos de minerais (Magotteaux, 2023)

Muito fácil <8kwh/tonelada	Médio 10 a 14 kwh/tonelada
Fácil 6 a < 10 kwh/tonelada	Difícil 14 a 18kwh/tonelada
Muito difícil >18kwh/tonelada	

Tabela 1 – Valores de referência para o teste de índice de trabalho WI Bond (Lamartine, 2014) [1].

Já na hidrociclonação, as partículas de quartzo maiores que o tamanho de interesse podem ser direcionadas para o overflow juntamente com as partículas finas e mais pesadas de minerais de ferro. Os processos aqui tratados, para moagem e hidrociclonação, são classificados como cominuição e classificação, respectivamente.

Segundo Rosa [2], as operações de cominuição são, normalmente, estagiadas e podem ser divididas entre britagem e moagem. Tradicionalmente, são divididas pela faixa granulométrica de alimentação e do produto, cabendo à britagem os primeiros estágios de cominuição, ou seja, a fragmentação de materiais mais grosseiros. A moagem, por outro lado, refere-se aos últimos estágios, determinando produtos mais finos e, por outro lado, recebendo alimentações com menores tamanhos de partículas.

Neste processo, as partículas são reduzidas pela combinação de impacto, compressão e, abrasão e atrito, a um tamanho adequado à liberação do mineral de interesse, possibilitando, serem concentradas nos processos subsequentes a moagem e classificação. Cada minério, possui uma malha ótima para ser moído, dependendo de muitos fatores, incluindo a distribuição do mineral útil na ganga (figura 4) e o processo de separação que vai ser usado em seguida. A moagem é a área da fragmentação que requer maiores investimentos, ocorre maiores gastos de energia, e atualmente é considerada como um processo importante para o bom desempenho de uma instalação de tratamento de minério, devido o empobrecimento das jazidas.

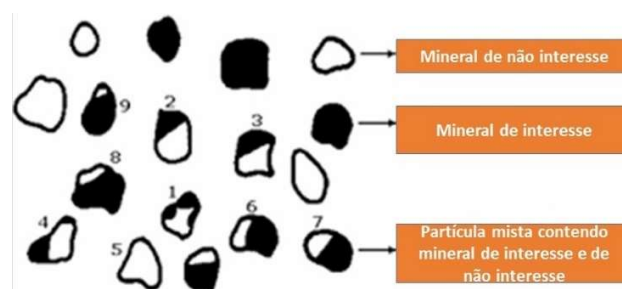


Figura 4 - Partículas mistas e partículas liberadas após processo de moagem, (Luz, 2010) [3].

Para as rotas de produção do minério de ferro, o processo de moagem mais comum adotado, se baseia normalmente através do uso de moinhos de bolas. Estes equipamentos, possuem como princípio de funcionamento o uso de corpos moedores, sendo composto na maioria de suas vezes, por bolas metálicas ou barras metálicas, onde por meio da movimentação rotativa do equipamento (360°), é promovido a colisão entre estes corpos com a polpa (água + partículas minerais). através disto ocorre a liberação de energia e gerando a quebra das partículas sólidas, reduzindo-as em tamanhos menores em relação ao que se encontravam vindas da etapa anterior.

Nos atuais circuitos existentes, as rotas que possuem a utilização de moinhos de bolas para a etapa de cominuição, comumente apresentam uma alimentação direta no equipamento, fato este que se dá devido a necessidade de redução de grande parte do material, pois ainda se encontram em frações grosseiras, e necessitando por sua vez da liberação. Este tipo de circuito é denominado como direto (figura 5), e possui como grande vantagem, o direcionamento de todo fluxo da massa das etapas de britagem diretamente para o processo de cominuição, entretanto o material já liberado na alimentação nova é moído de forma desnecessária.

Outro tipo de circuito, consistindo também em uma etapa com a adoção de moinhos de bolas, todavia tão pouco utilizado, trata-se de um circuito conhecido como reverso [figura 6]. Este, possui como principal diferença em relação aos circuitos tradicionais, a alimentação realizada primeiramente na etapa de classificação por meio de bombeamento em hidrociclones. Este tipo de circuito, possui como alimentação do processo de moagem, as partículas com maior velocidade de sedimentação (fração grossa), classificadas no *underflow* dos hidrociclones, enquanto as partículas com menor velocidade de sedimentação (fração fina) serão direcionadas para o *overflow* do equipamento de classificação, estando propícias para as etapas posteriores ao processo de moagem, devido encontrar-se com granulometria adequada.

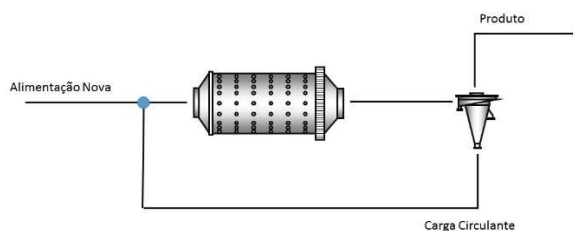


Figura 5 - Esquematização de circuito com processo de moagem direta (Elaborado pelo autor, 2024).

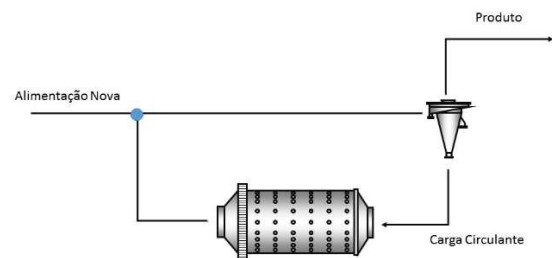


Figura 6 - Esquematização de circuito com processo de moagem reversa (Elaborado pelo autor, 2024).

Os hidrociclones (figura 7) possuem vasta aplicação na área de processamento mineral. Dentre outras, podem ser citadas:

- (i) nos circuitos fechados de moagem;
- (ii) na deslamagem de minérios para a flotação;
- (iii) na remoção de partículas menores que 10 μm , operação de deslamagem.

A energia potencial armazenada na polpa, em razão do bombeamento é transformada em energia cinética, e devido à geometria do hidrociclone, esta produz um movimento rotacional da polpa. As partículas de diâmetros maiores tendem a ocupar as regiões mais periféricas do cilindro e, conseqüentemente, do cone. As partículas de diâmetros menores são deslocadas para a região central do hidrociclone. Desta forma, a região próxima à parede do hidrociclone é ocupada, preferencialmente, por polpa com predominância de partículas grossas e a região central, por polpa com predominância de partículas finas [4].

Na região central do hidrociclone, na qual ocorre a mudança da seção cilíndrica para a cônica, o sentido do escoamento é invertido. Nessa seção cônica ocorre o estrangulamento no *apex* do cone, fazendo com que a maior parte do fluxo, com menor quantidade de partículas, seja descarregado no orifício oposto, o *vortex finder*, de diâmetro relativamente maior que o do *apex*. Isto possibilita a classificação, pois a polpa da região central, descarregada pelo overflow, contém uma população relativamente maior de partículas finas comparada àquela descarregada pelo underflow.

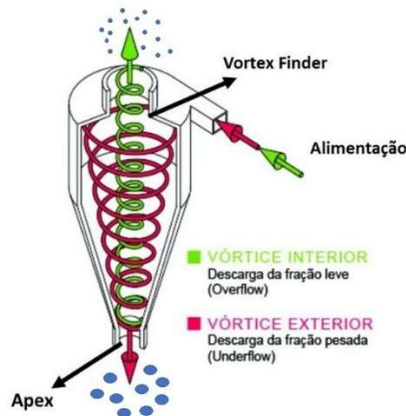


Figura 7 - Esquemática do funcionamento de um Hidrociclone (AKW, 2018) [5].

Segundo Donda [6], uma das desvantagens deste tipo de processo, durante estudo realizado em um circuito de moagem reversa, em caráter alternativo na unidade operacional de Germano (Samarco), refere-se ao envio de partículas grosseiras de quartzo (partículas de não interesse) ao overflow dos ciclones.

Dentre outros conceitos importantes a serem apresentados nessa revisão, destacam-se:

- (i) Granulometria: medidas do tamanho dos elementos que compõem o solo, uma rocha ou um sedimento detrítico;
- (ii) Curvas Granulométricas: apresenta intervalos de variação do tamanho das partículas do material analisado;
- (iii) F80 – Abertura através da qual 80% do produto passarão na alimentação da moagem (underflow classificação);
- (iv) P80 - Abertura através da qual 80% do produto passarão na descarga da moagem;
- (v) O fator redução da moagem, pode ser determinado a partir da equação 1 descrita logo abaixo:

Equação 1:

$$\text{Fator redução} = \frac{F80}{P80}$$

Onde se representa:

- (i) F80 – Abertura através da qual 80% do produto passarão na alimentação da moagem (underflow classificação);
- (ii) P80 - Abertura através da qual 80% do produto passarão na descarga da moagem.

Outro valor importante trata-se da carga circulante ótima da moagem. A equação 2 pode ser usada para o cálculo da carga circulante “ideal”, ou seja, a carga circulante correspondente à máxima capacidade, conjuntamente, das etapas de moagem e classificação.

$$\text{Carca Circulante Ót} \quad \text{Equação 2} \quad \cdot) \times \sqrt{WI} \times \sqrt[4]{Rr}$$

Onde:

- D = diâmetro do moinho (m), interno aos revestimentos;
- L = comprimento interno do moinho (m);
- Rr = razão de redução, ou seja, a fração entre o F80 e o P80 do circuito;
- Wi = Work Index (kWh/ton).

Esta equação leva em conta:

- O tempo de residência no moinho, fortemente influenciado pela relação D/L do moinho;
- A quantidade de partículas “prontas” na alimentação do circuito, definida pela razão de redução;
- As características do minério, definidas pelo Wi de Bond.

3 DESENVOLVIMENTO

A alimentação prevista para o circuito de moagem do projeto Tico Tico consiste em uma massa de 1.175 t/h (base seca), possuindo uma composição química de 50,5% de ferro e 26% de sílica.

Diante do fato da usina Tico Tico ainda estar em fase de *ramp up*, tem-se necessidade de se conhecer melhor o produto gerado pela classificação reversa por hidrociclones em linha com um moinho de bolas. Até o presente momento, esse processo dispõe de uma pequena quantidade de dados referentes às análises físico-químicas dos fluxos desse processo, surgindo a necessidade de gerar uma simulação desse processo para obter resultados de overflow a serem estudados de acordo com diversos cenários possíveis de alimentação composta pelos fluxos do *undersize* do peneiramento a úmido (<10mm) e o produto moído do moinho de bolas.

De posse dos dados da engenharia do projeto da usina de beneficiamento, foram gerados o balanço de massas (figura 9) e a tabela 2 contendo os dados de processo que serviram de base comparativa para realização das análises referentes aos cenários simulados. Também, foram geradas as distribuições granulométricas da alimentação do circuito de classificação, bem como o produto originado no overflow e underflow, curva granulométrica do Figura 8.

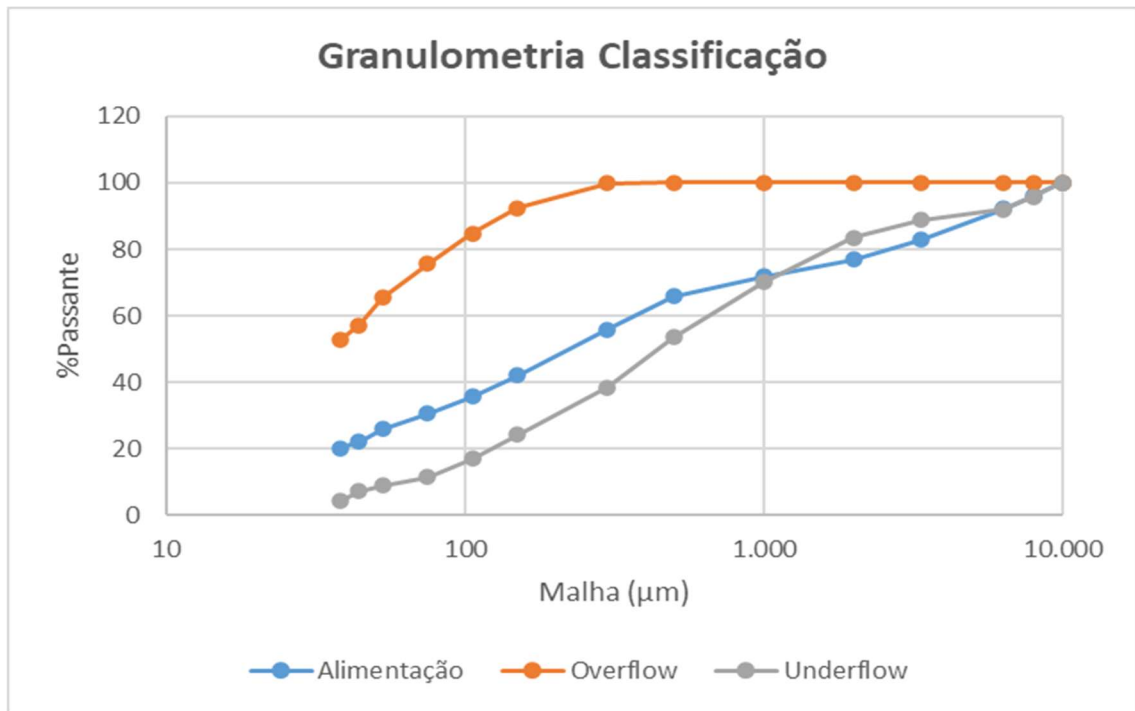


Figura 8 - Curva Granulométrica Classificação Circuito de Moagem Projeto Tico Tico (Mineração Morro do Ipê, 2023).

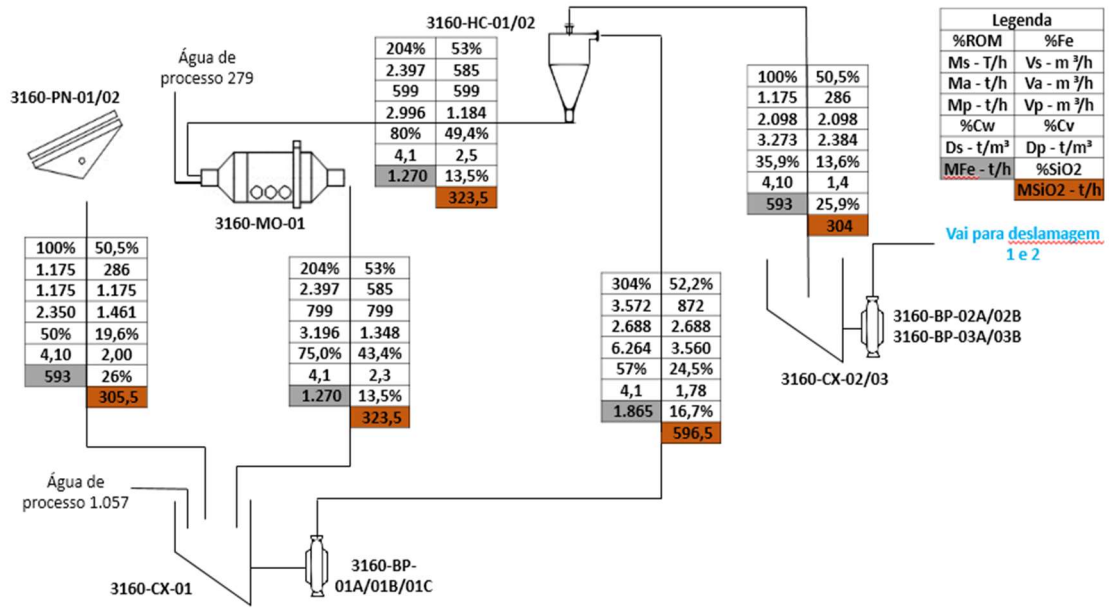


Figura 9 - Fluxograma de processo com balanço de massa do circuito de moagem reversa adotada no projeto Tico Tico (Elaborado pelo autor).

	Alim. Nova	Moagem					Ciclone 26"	OF Classificação					
	US Peneiramento Úmido A80 (µm)	bWi (kWh/t)	Moagem A80 (µm)	Fator Redução	Carga Circulante (%)	Moagem P80 (µm)	Alim. Total Classificação (tph)	P80 (µm)	+ 150 µm	-150 +10 µm	- 10 µm	Fe(%)	SiO2(%)
Projeto	3515	10,7	4252	28,35	204	150	3572	95	7,50	82,50	10,00	50,50	26,00

Tabela 2 – Resultados Processo Produto da Moagem e Classificação (Mineração Morro do ipê, 2023).

O minério que alimentará a usina de beneficiamento tem origem de várias frentes de lavra da mina de Tico Tico, constituindo-se da formação de blend para que os teores especificados possam ser alcançados. Para realizar o mapeamento das frentes de lavra, foram realizadas campanhas de amostragens com diversos furos de sondagens pela equipe de planejamento de lavra e testes de caracterização pela equipe de desenvolvimento de processos afim de realizar o reconhecimento do modelo geológico da mina, conforme visto na figura 10 abaixo.

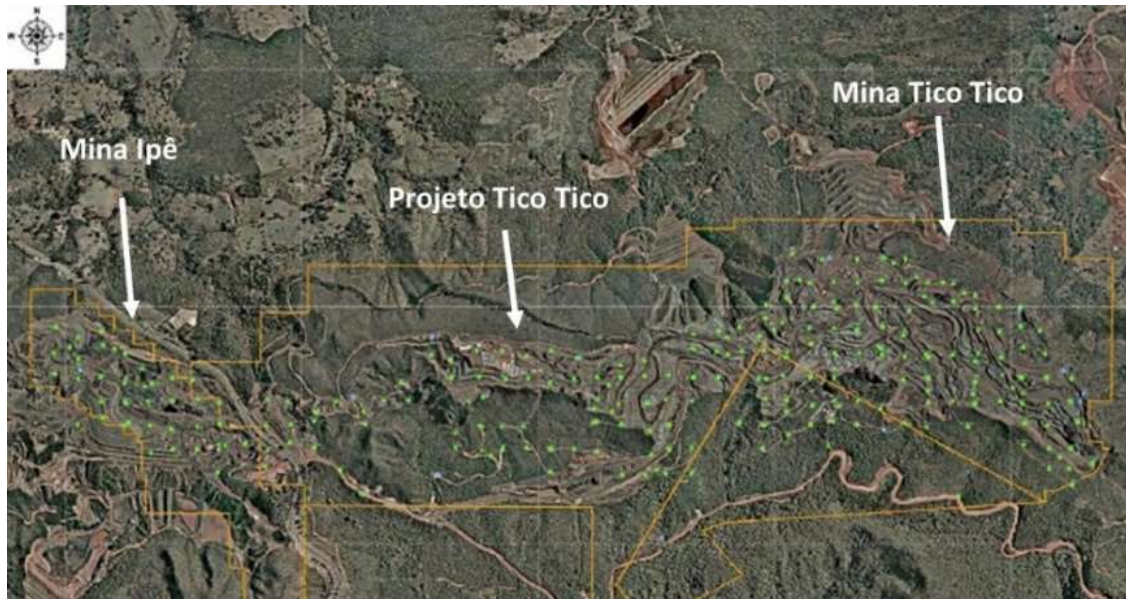


Figura 10 - Mapeamento de furos de sondagens realizados pela empresa (Mineração Morro do Ipê, 2016).

A caracterização litológica na Mineração Morro do Ipê, se baseia no método MR1, onde uma amostra de ROM britado em 25 mm é peneirado na malha 6,3mm e, obtendo-se o valor percentual de massa retida nessa malha, compra-se com os dados da tabela 3 para classificar a qual litologia pertence o minério a ser processado. A partir dos furos de sondagem, e caracterização litológica, foi possível realizar o mapeamento geológico da mina Tico Tico, conforme figura 11 da página seguinte.

MR1 - % de Itabirito compacto	Litologia
MR1 > 60%	Itabirito Compacto (IC)
40% < MR1 < 60%	Itabirito Semi-Compacto (ISC)
MR1 < 40%	Itabirito Friável (IF)

Tabela 3 - Método de caracterização litológica (Mineração Morro do Ipê, 2023).

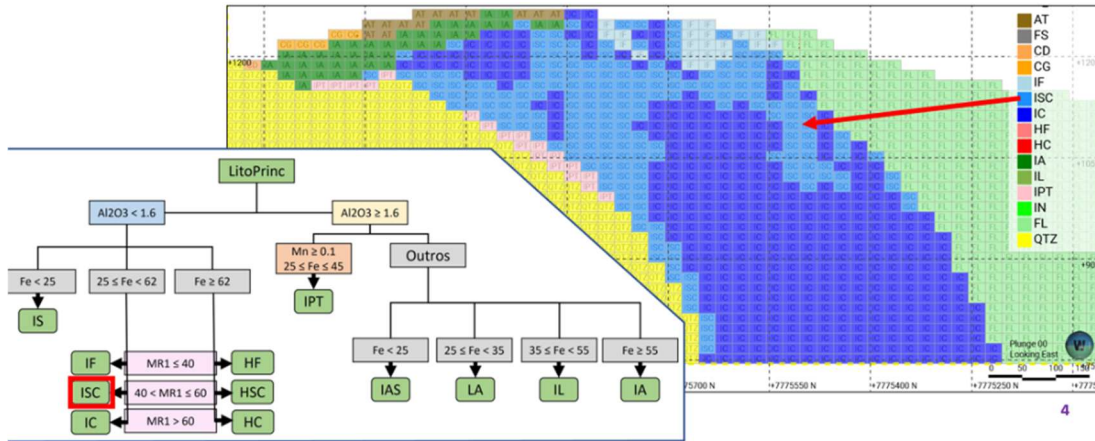


Figura 11 - Mapeamento geológico da mina Tico Tico (Mineração Morro do Ipê, 2023).

Ainda durante a fase de projeto, foram realizados diversos testes pela equipe de desenvolvimento de processos da Mineração Morro do Ipê, sendo feitos em planta piloto na Fundação Gorceix no município de Ouro Preto – MG. Estes testes tiveram como principal objetivo a avaliação das amostras de blend representativos dos anos de lavra de 2023 a 2028 da mina de Tico Tico.

As simulações foram realizadas com o software de simulação de usinas de processamento mineral *ModSim*TM [9]. O moinho foi simulado utilizando o modelo de HFSU implementado no *ModSim*TM [9]. Os parâmetros de classificação foram determinados através do módulo *CurveFit* do *ModSim*TM *Professional* [9] utilizando amostragens de circuito de moagem de bolas operado com minério de ferro. Esse procedimento foi adotado uma vez que o circuito industrial do projeto Tico-Tico ainda não está em operação.

O banco de dados para a simulação no software *ModSim*TM [9], foi gerado através de 4 diferentes cenários que foram levantados pela gerência de serviços técnicos, em conjunto com as equipes de planejamento de lavra, e desenvolvimento de processos da Mineração Morro do Ipê. Conforme observa-se nas tabelas 4 e 5 na página seguinte, todavia, devido à ausência de um equipamento de fluorescência de raio-X, não foi possível realizar uma análise granulométrica do material presente nestes cenários.

Cenários	Teor de Ferro	Teor de Sílica	Teor de Alumina	Teor de Fósforo	Teor de Manganês
Projeto	50,50%	26,00%	0,80%	0,05%	0,02%
Cenário 1	44,10%	33,60%	0,94%	0,04%	0,02%
Cenário 2	46,20%	29,80%	1,40%	0,06%	0,03%
Cenário 3	47,30%	28,80%	1,25%	0,02%	0,02%
Cenário 4	49,60%	26,40%	1,08%	0,03%	0,02%

Tabela 4- Cenários usados para simulação no *ModSim*TM (Elaborado pelo autor).

Cenários	MR1 - % de Itabirito compacto	Litologia
Cenário 1	39,20%	Itabirito Friável
Cenário 2	37,90%	Itabirito Friável
Cenário 3	27,40%	Itabirito Friável
Cenário 4	26,43%	Itabirito Friável

Tabela 5 - Cenários usados para simulação no *ModSim*TM (Elaborado pelo autor).

As simulações ocorreram levando em consideração os parâmetros operacionais de processos projetados para o circuito de moagem e classificação, conforme mencionados na introdução deste artigo. Os parâmetros que serão apresentados ao decorrer desse trabalho são:

- (i) Para hidrociclonação de classificação: A80 da alimentação nova, P80 do overflow e massa total alimentada;
- (ii) Para a moagem: A80, P80, fator de redução, percentual de carga circulante;
- (iii) Para o overflow da classificação: o retido na malha 150 e o passante na malha 10.

Os dados serão apresentados em forma gráfica ou tabelas, de forma a comparar e analisar de forma sensível o que poderá ocorrer nos processos de deslamagem e flotação.

4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Depois de realizado a simulação de cada um dos cenários vistos na tabela 3 através da utilização do software *ModSim*TM [7], foi possível obter as curvas granulométricas e o balanço de massa de cada um dos cenários 1 a 4, cujos respectivos fluxogramas, gráficos e tabelas, apresentados em ordem sequencial: fluxogramas em figuras 12 à 23, tabelas 6, à 9 a seguir.

1 - Simulação para o Cenário 1 de 44,1% de ferro na alimentação:

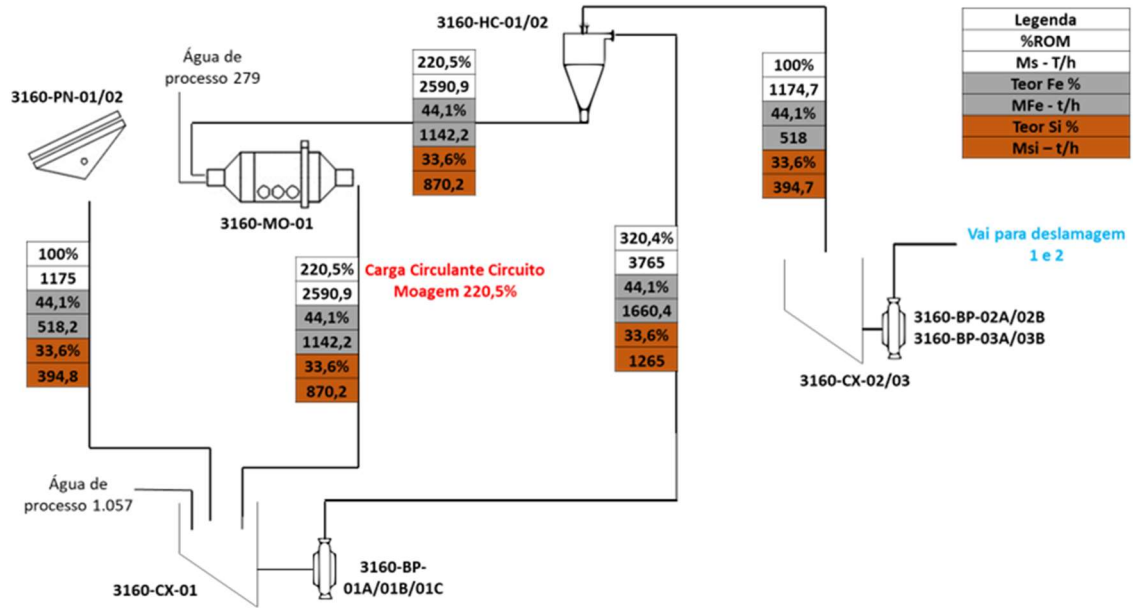


Figura 12 - Fluxograma de processo com balanço simulado para Cenário 1 (Elaborado pelo autor).

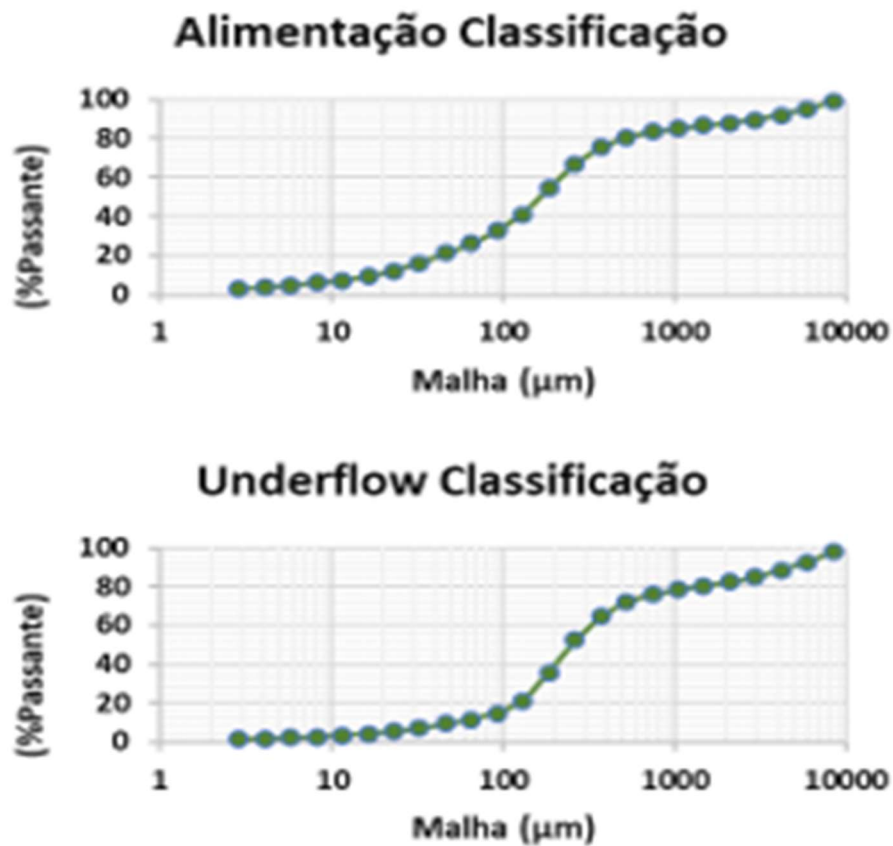


Figura 13 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 1 (Elaborado pelo autor).

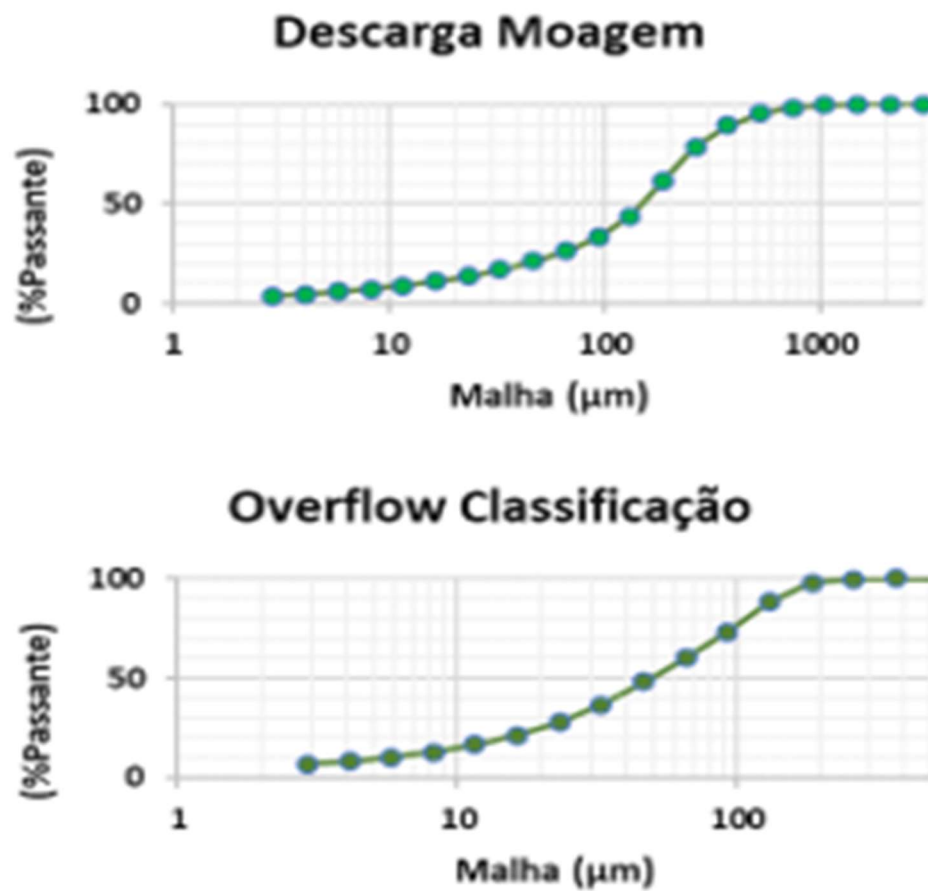


Figura 14 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 1 (Elaborado pelo autor).

	Alim. Nova	Moagem					Ciclone 26"	OF Classificação					
	US Peneiramento Úmido A80 (μm)	bWi (kWh/t)	Moagem A80 (μm)	Fator Redução	Carga Circulante (%)	Moagem P80 (μm)	Alim. Total Classificação (tph)	P80 (μm)	+ 150 μm	-150 +10 μm	- 10 μm	Fe(%)	SiO ₂ (%)
Cenário 1	6062	11,9	1320	12,34	221	281	3765	107	8,17	77,93	13,90	44,10	33,60

Tabela 6 – Resultados Parâmetros Processo Gerados Simulados para Cenário 1 (Elaborado pelo autor).

2 - Simulação para o Cenário 3 de 46,2% de ferro na alimentação:

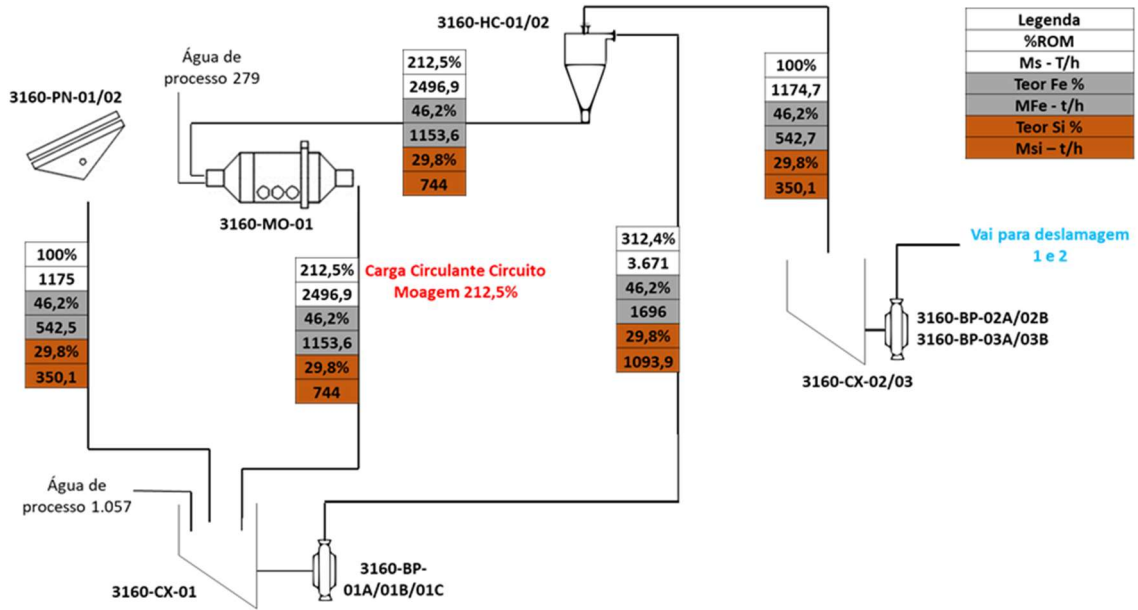


Figura 15 - Fluxograma de processo com balanço simulado para Cenário 2 (Elaborado pelo autor).

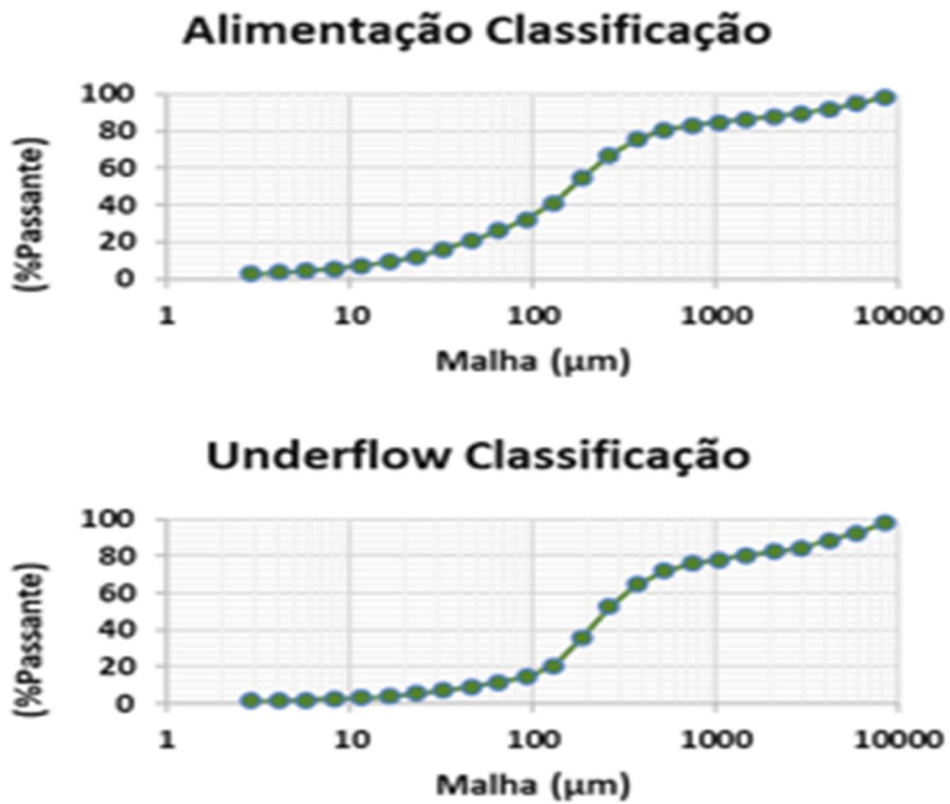


Figura 16 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 2 (Elaborado pelo autor).

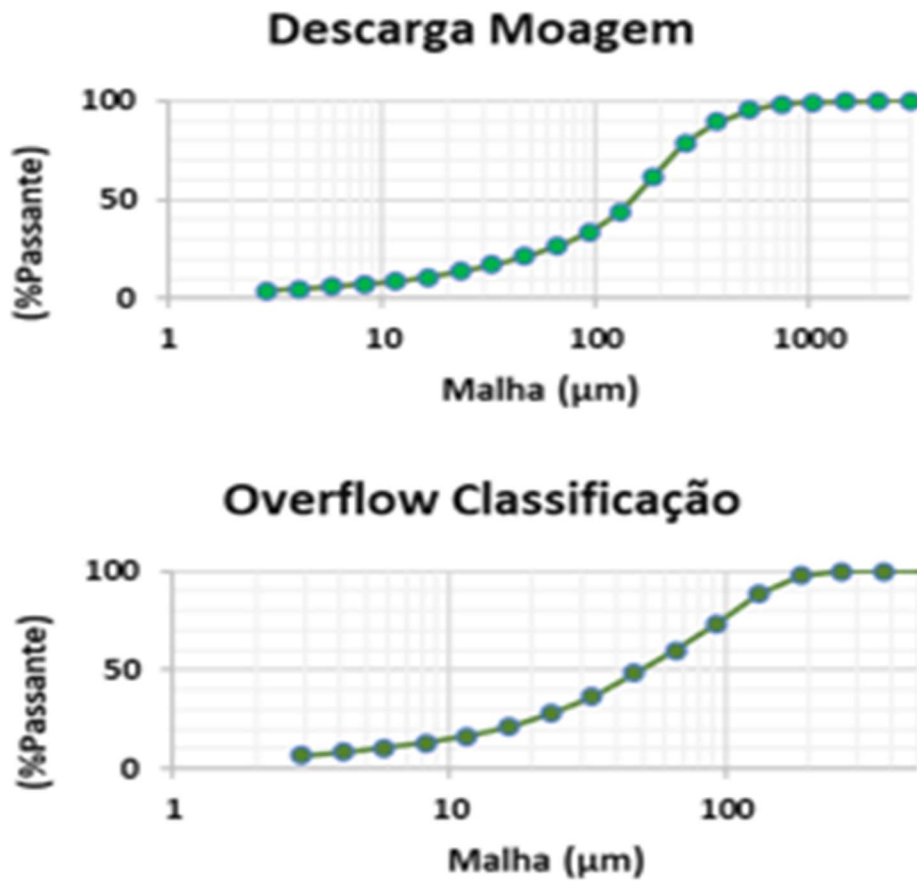


Figura 17 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 2 (Elaborado pelo autor).

	Alim. Nova	Moagem					Ciclone 26"	OF Classificação					
	US Peneiramento Úmido A80 (µm)	bWi (kWh/t)	Moagem A80 (µm)	Fator Redução	Carga Circulante (%)	Moagem P80 (µm)	Alim. Total Classificação (tph)	P80 (µm)	+ 150 µm	-150 +10 µm	- 10 µm	Fe(%)	SiO2(%)
Cenário 2	5449	11,3	1370	12,80	213	273	3671	107	8,60	75,60	15,80	46,20	29,80

Tabela 7 – Resultados Parâmetros Processo Gerados Simulados para Cenário 2 (Elaborado pelo autor).

3-Simulação para o Cenário 3 de 47,3% de ferro na alimentação:

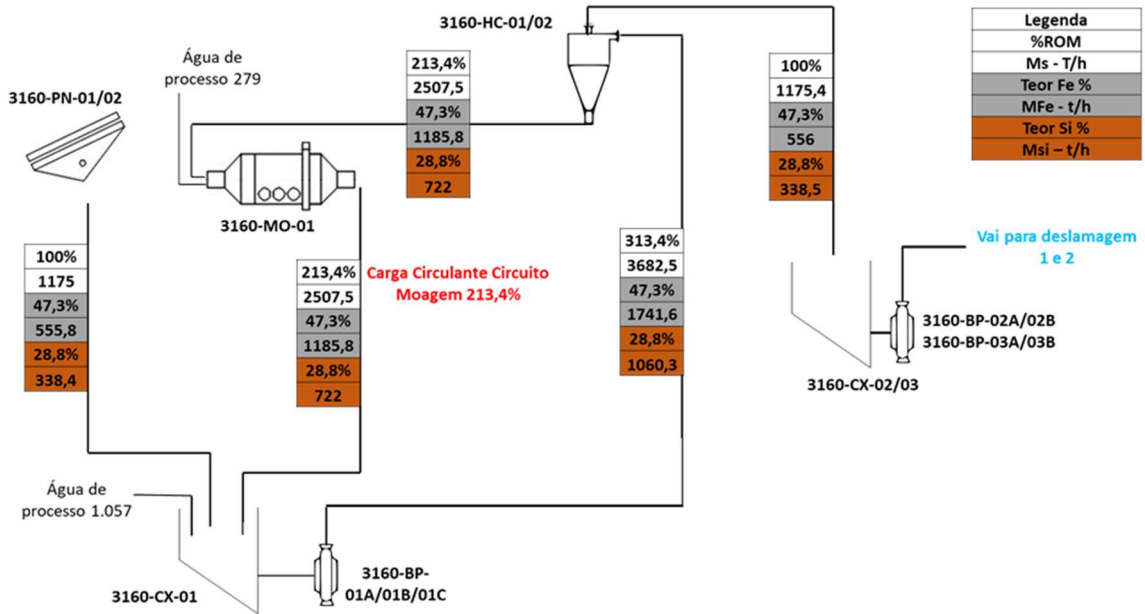


Figura 18 - Fluxograma de processo com balanço simulado para Cenário 3, (Elaborado pelo autor).

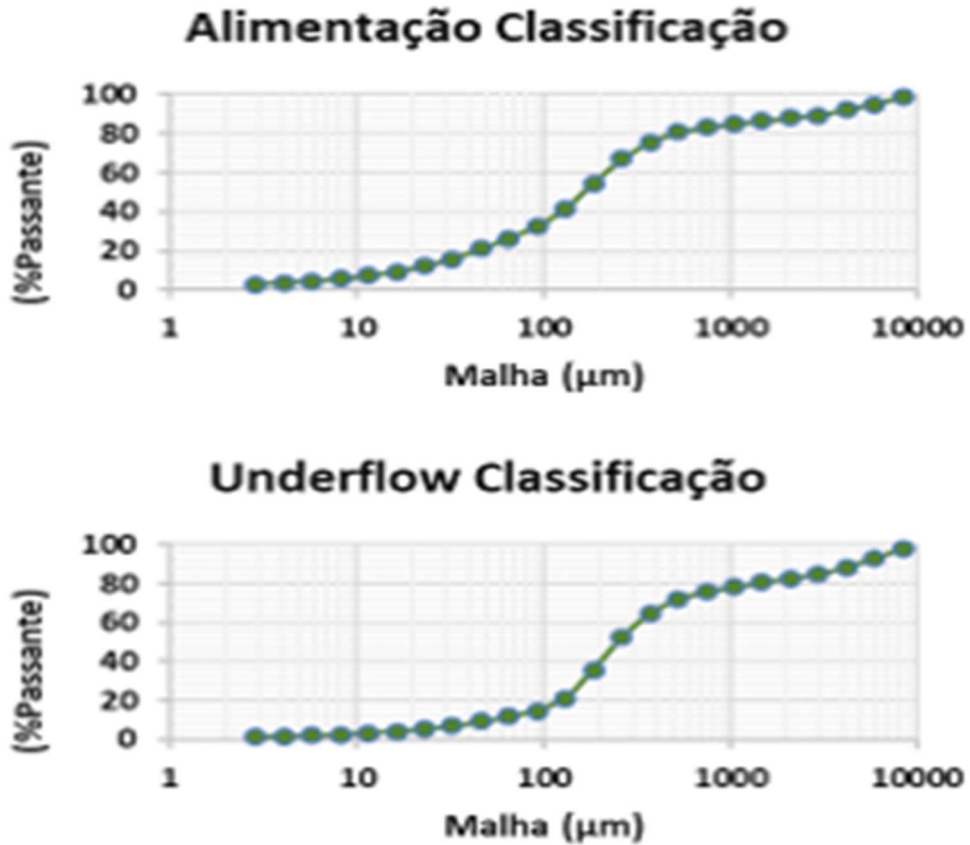


Figura 19 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 3, (Elaborado pelo autor).

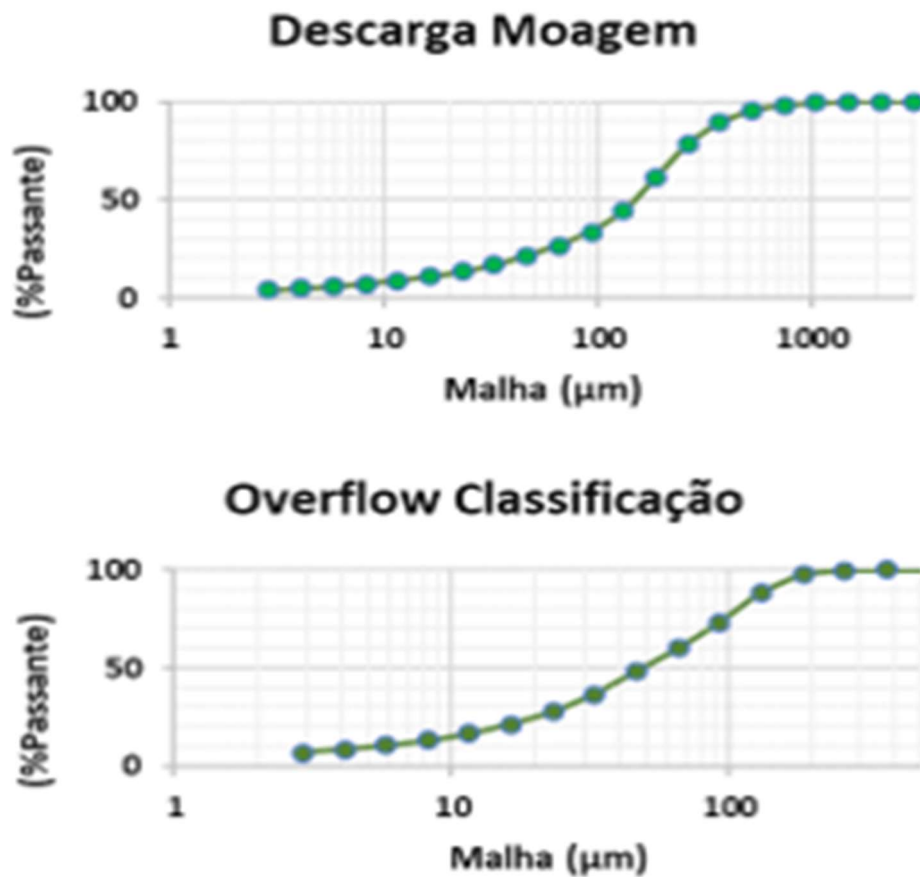


Figura 20 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 3, (Elaborado pelo autor).

	Alim. Nova	Moagem					Ciclone 26"	OF Classificação					
	US Peneiramento Úmido A80 (μm)	bWi (kWh/t)	Moagem A80 (μm)	Fator Redução	Carga Circulante (%)	Moagem P80 (μm)	Alim. Total Classificação (tph)	P80 (μm)	+ 150 μm	-150 +10 μm	- 10 μm	Fe(%)	SiO2(%)
Cenário 3	4789	13,0	983	9,45	213	269	3682	104	7,73	75,56	16,71	47,30	28,80

Tabela 8 – Resultados Parâmetros Processo Gerados Simulados para Cenário 3, (Elaborado pelo autor).

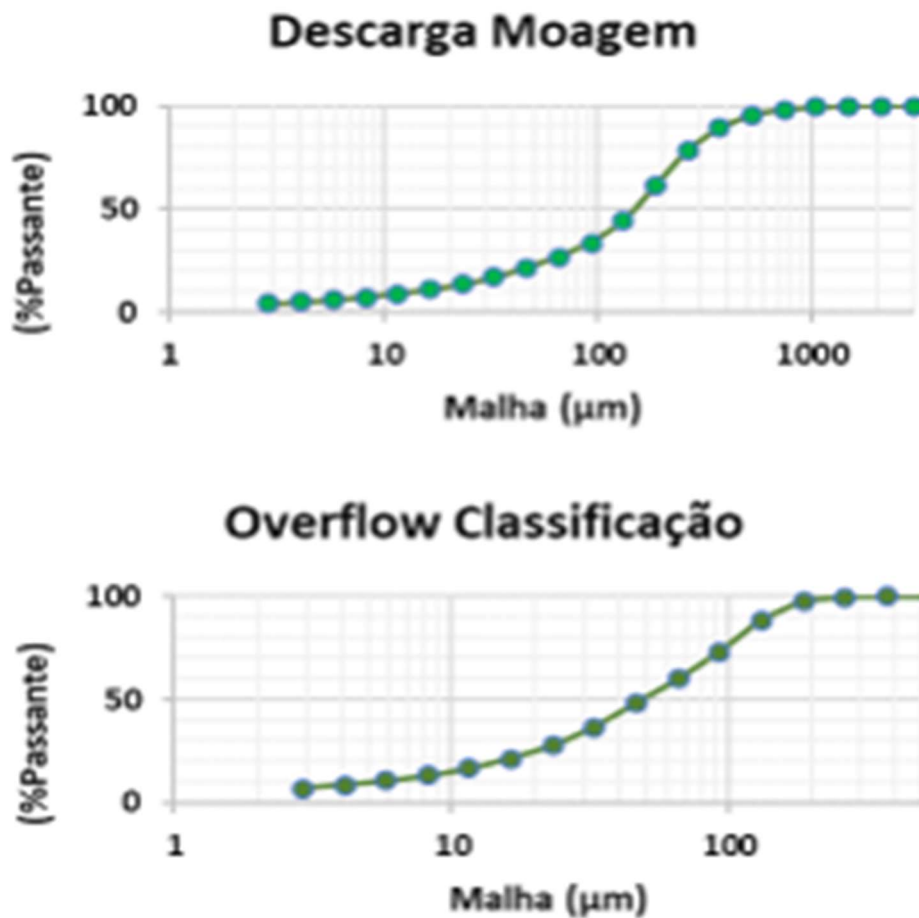


Figura 23 - Curvas Granulométricas Simuladas para Cenário 4 (Elaborado pelo autor).

	Alim. Nova	Moagem					Ciclone 26"	OF Classificação					
	US Peneiramento Úmido A80 (µm)	bWi (kWh/t)	Moagem A80 (µm)	Fator Redução	Carga Circulante (%)	Moagem P80 (µm)	Alim. Total Classificação (tph)	P80 (µm)	+ 150 µm	-150 +10 µm	- 10 µm	Fe(%)	SiO2(%)
Cenário 4	3996	10,6	1060	10,29	197	251	3540	103	7,51	75,47	17,02	49,60	26,40

Tabela 9 – Resultados Parâmetros Processo Gerados Simulados para Cenário 4 (Elaborado pelo autor).

Após obter os cenários através do simulador, foi possível gerar dados para realização das comparações e análises dos impactos nos processos de deslamagem e flotação do projeto.

5 ANÁLISE E RESULTADOS

Essa análise dos resultados simulados se atentou às variáveis mais importantes para o processo de redução e classificação dos minerais pertencentes à alimentação dos circuitos de classificação e moagem.

Primeiramente, destacou-se a plotagem das curvas granulométricas (figuras 24, 25 e 26), em único gráfico, para cada ponto simulado: alimentação da classificação, descarga da moagem e overflow da classificação.

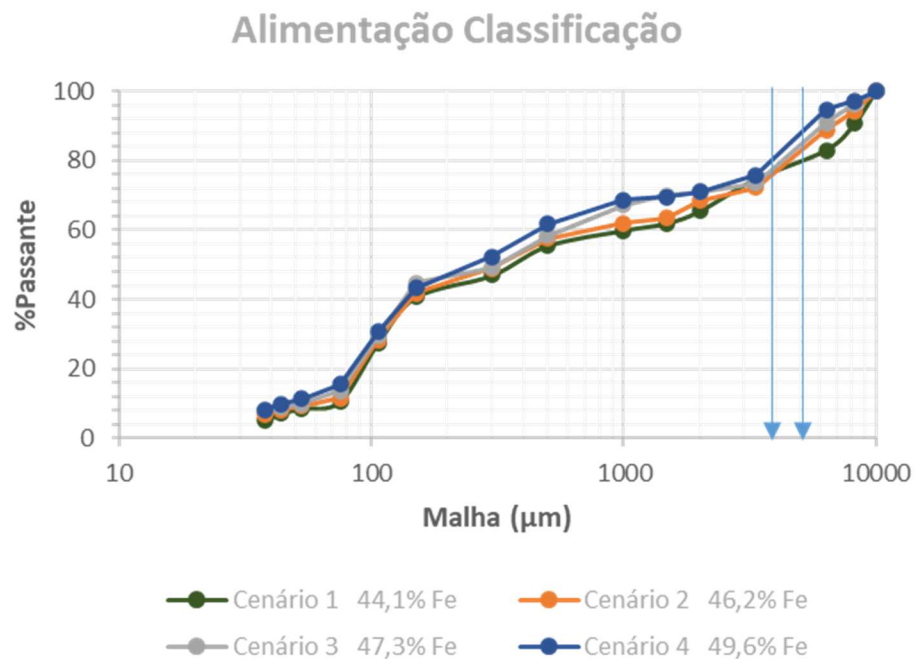


Figura 24 - Curvas Granulométricas Simuladas Sobrepostas Cenários-Alimentação Classificação (Elaborado pelo autor).

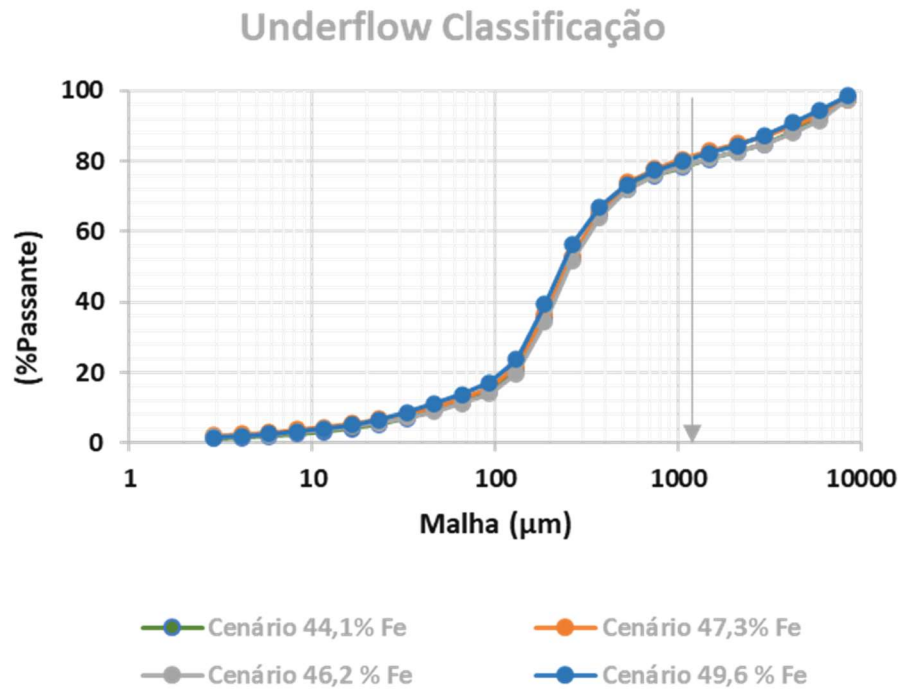


Figura 25 - Curvas Granulométricas Simuladas Sobrepostas Cenários-Underflow Classificação (Elaborado pelo autor).

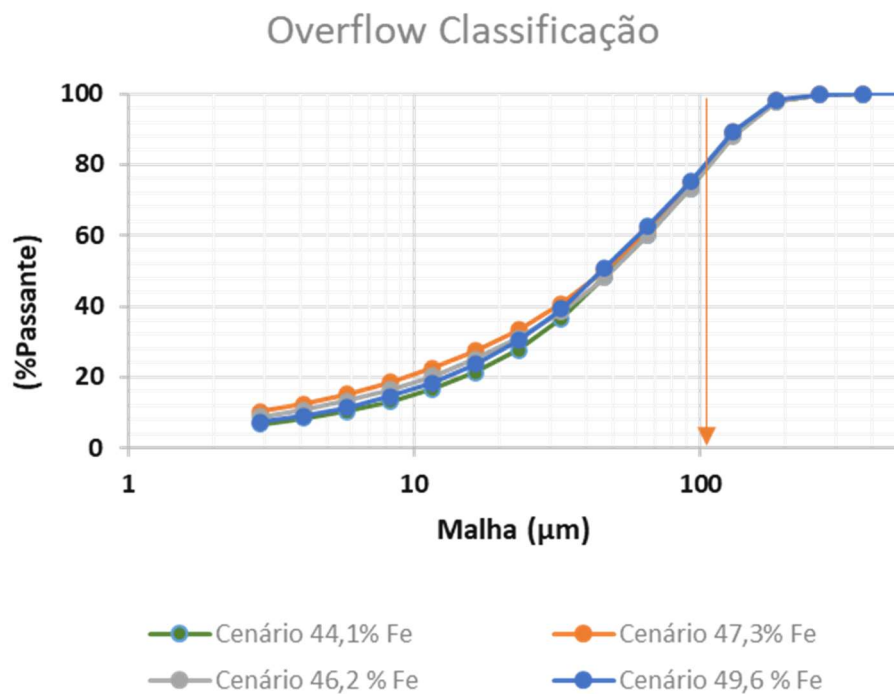


Figura 26 - Curvas Granulométricas Simuladas Sobrepostas Cenários – Overflow Classificação (Elaborado pelo autor).

Em se tratando de granulometria, aparentemente, quando se vê as curvas granulométricas plotadas em sobreposição, não se percebe grande variação que possa gerar impactos nos processos simulados e posteriores. Porém, quando a análise abrangeu os demais dados de processo que estão presentes na tabela 10, podem-se verificar impactos com certa relevância.

	Alim. Nova	Moagem					Ciclone 26"	OF Classificação					
	US Peneiramento Úmido A80 (µm)	bWi (kWh/t)	Moagem A80 (µm)	Fator Redução	Carga Circulante (%)	Moagem P80 (µm)	Alim. Total Classificação (tph)	P80 (µm)	+ 150 µm	-150 +10 µm	- 10 µm	Fe(%)	SiO2(%)
Projeto	3515	10,7	4252	28,35	204	150	3572	95	7,50	82,50	10,00	50,50	26,00
Cenário 1	6062	11,9	1320	12,34	221	281	3765	107	8,17	77,93	13,90	44,10	33,60
Cenário 2	5449	11,3	1370	12,80	213	273	3671	107	8,60	75,60	15,80	46,20	29,80
Cenário 3	4789	13,0	983	9,45	213	269	3682	104	7,73	75,56	16,71	47,30	28,80
Cenário 4	3996	10,6	1060	10,29	197	251	3540	103	7,51	75,47	17,02	49,60	26,40

Tabela 10 – Resultados Parâmetros Processo Gerados Simulados para os cenários (Elaborado pelo autor).

Cabe ressaltar que, comparativamente na média, nenhum dos parâmetros simulados se aproximou dos parâmetros definidos pela engenharia de projetos. Por esse fato, a partir daqui, foram analisados os resultados simulados, comparando com os dados de projeto, a fim de apresentar os prováveis impactos nos processos.

A seguir, serão apresentadas as comparações referentes aos dados simulados obtidos para a hidrociclonação. Os gráficos a seguir (figura 27) comparam o A80 da alimentação nova, o P80 gerado no overflow e a alimentação total dos hidrociclones no circuito de moagem reversa.

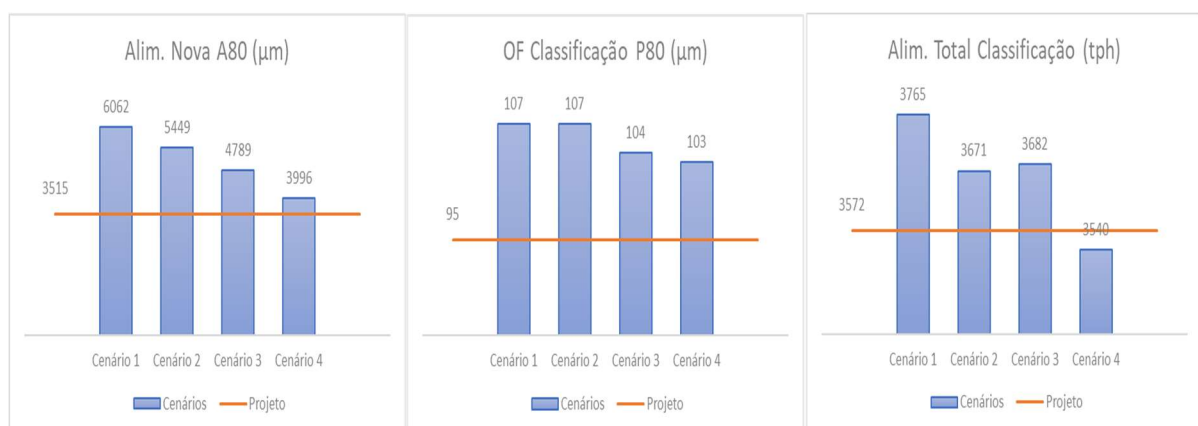


Figura 27 – Comparativo A80, P80 e Alimentação total Classificação (Elaborado pelo autor).

Comparativamente, o A80, o P80 e a alimentação total da classificação, variam, na média, de acordo com o empobrecimento da alimentação nova, ou seja, à medida que o blend

da alimentação aumenta a participação de semi-compactos, tornando a alimentação granulometricamente mais grossa, subindo de faixa o P80 e aumentando a massa total alimentada na classificação, devido ao provável aumento da carga circulante da moagem.

O principal ponto de destaque na avaliação da simulação dos dados de alimentação ficou para o aumento da alimentação total da classificação, pois à medida que ela aumenta, haverá necessidade de redução de alimentação nova desse circuito. O cenário que se destaca entre os demais é o cenário 1, com massa horária de 3.765 toneladas por hora (tph), contra 3.572 tph definidas no projeto.

Já para a moagem, as comparações se deram para o fator de redução da moagem e carga circulante.

Em sequência, analisados os parâmetros simulados nos gráficos logo a seguir (figura 28), ficou demonstrado que a alimentação total da classificação é maior no cenário 1 pelo fato da carga circulante ser maior que os demais cenários pela necessidade do moinho reduzir mais o minério a medida que o teor de sílica aumentou. Fato esse, que notadamente é visto pelo cenário 1 apresentar maior dificuldade de moer o minério pelo fato do aumento do teor de sílica maior que o projeto, principalmente pelo aumento da participação de minérios compactos.

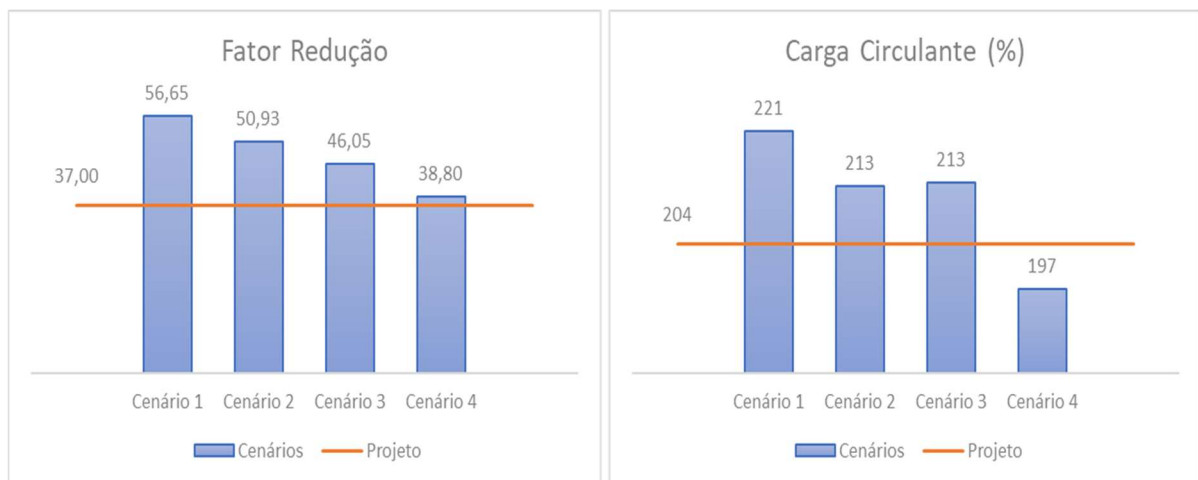


Figura 28 – Comparativo fator de redução de moagem e carga circulante (Elaborado pelo autor).

Um fato importante também analisado, trata-se do bond work index para cada um destes cenários, onde foi gerado os seguintes resultados conforme apresentados na figura 29.

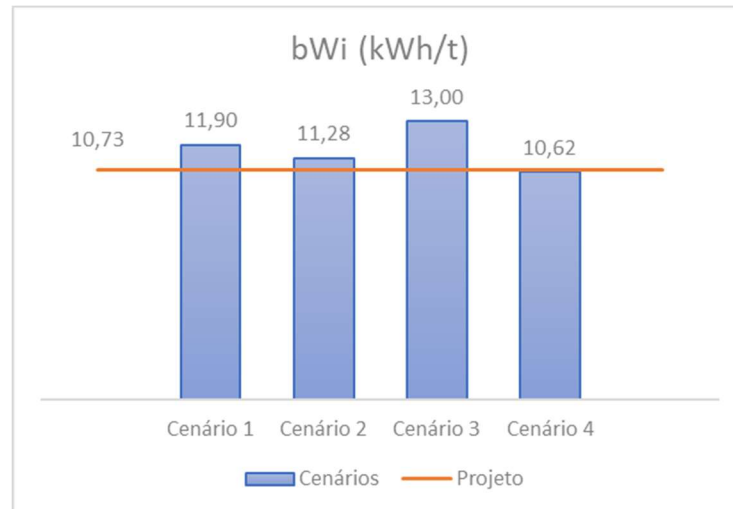


Figura 29 – Comparativo do bWi simulado para cada um dos cenários (Elaborado pelo autor).

Conforme visto no gráfico acima, nota-se que nas simulações não houve uma tendência de ordem crescente do bwi de acordo com os cenários, pois vale ressaltar que alguns fatores podem estar contribuindo para essa variação, dentre eles destacam os dois fatores mais relevantes mencionados logo abaixo.

- **Dureza e Fragilidade:** Minerais mais duros ou frágeis geralmente apresentam um BWI mais alto, indicando que requerem mais energia para serem moídos.
- **Composição Mineral:** Diferentes minerais têm propriedades de moagem variadas, o que pode influenciar o BWI.

Portanto, nota-se que o cenário com maior resistência a cominuição, trata-se do cenário de número 3, entretanto se dá necessário uma análise química e mineralógica de cada um destes cenários, para que assim possa ser tirada maiores conclusões.

Passa-se a analisar e dar o devido destaque ao overflow da classificação, pois o mesmo é o produto de todo o processo de moagem reversa e classificação. Os dados simulados apresentados para esse fluxo são os que norteiam a análise de impactos em processos subsequentes como o de deslamagem e de flotação. Os gráficos da figura 30 (próxima página), apresentam os teores de ferro e sílica e, as faixas granulométricas +150 mm, -150 +10 mm e -10 mm. Eles trazem a leitura do empobrecimento do minério alimentado pelo motivo da entrada do semi-compacto no blend.

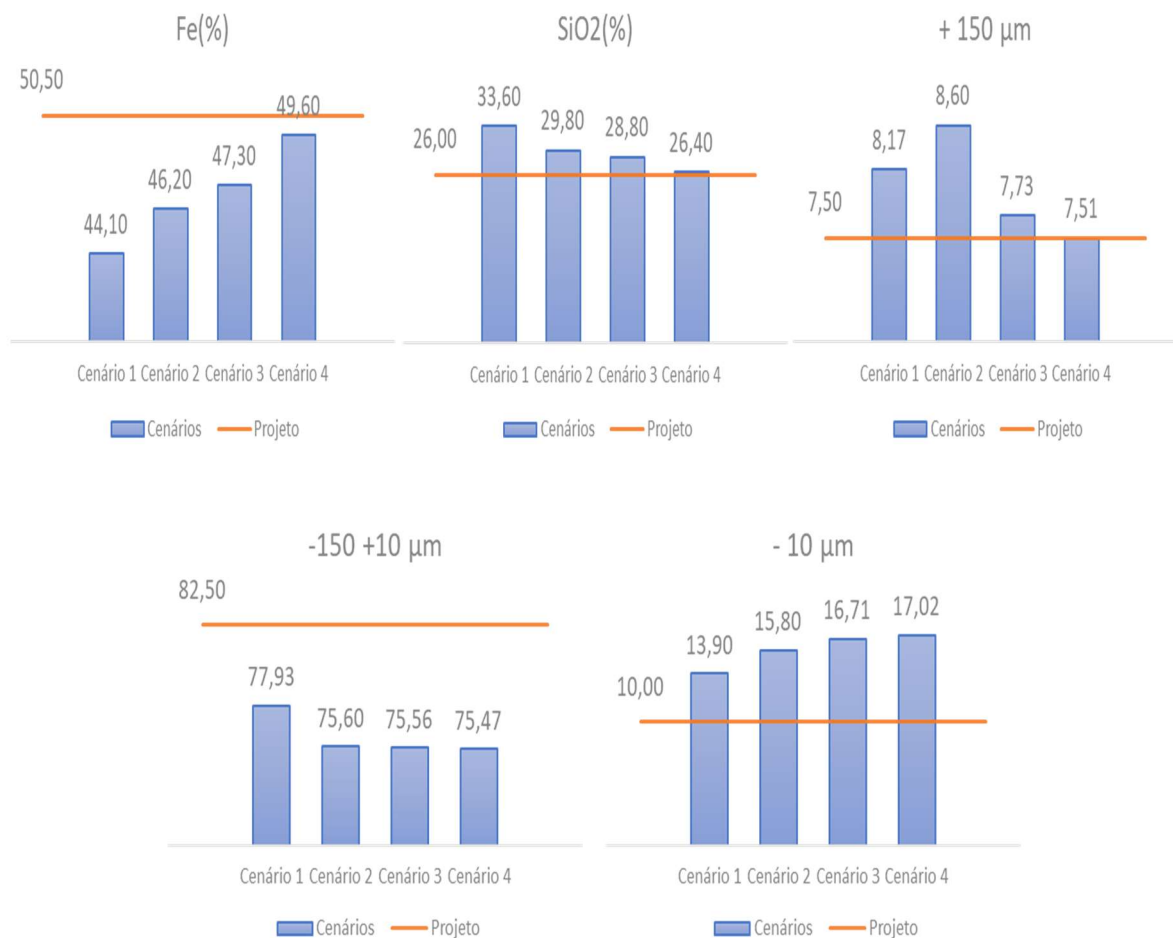


Figura 30 – Comparativo %Fe, %SiO₂, +150 mm, -150 +10 mm e -10 mm (Elaborado pelo autor).

Em suma, somente a redução do teor de ferro na alimentação provavelmente já traria impactos na flotação como redução da recuperação em massa e metalúrgica e um certo aumento na dosagem de reagentes para manutenção da qualidade do produto final especificada no projeto. Tocado no ponto especificação de projeto, tem-se outro grupo de variáveis que não estão conforme a definição premissada.

Nesse grupo de análise, destacam-se os parâmetros +150 mm e -10 mm e, os cenários 2 e 4 se destacam, respectivamente.

A geração de lamas é maior no cenário 4, que provavelmente, a composição do blend, por conter mais minérios friáveis, apresentam maiores proporções de minérios hidratados e mais fáceis de moer. Aqui, notou-se que, o cenário 4 com geração de 17,02% de lamas contra os 10% especificados no projeto se destacou. Observa-se que poderá se ter o circuito de deslamagem sobrecarregado por excesso de massa, reduzindo sua eficiência, e também, reduzindo a alimentação nova da usina de beneficiamento.

Por fim, a análise de dados simulados chega ao ponto principal da abordagem, que é a geração de partículas acima de 150 mm no overflow da classificação (8,6% no cenário 2). Como a densidade da sílica é menor que a dos minerais de ferro, é muito provável que partículas de

sílica sejam as maiores componentes da massa gerada nessa faixa granulométrica. Essa faixa granulométrica é de difícil flotação e, a depender da quantidade de massa acima de 150 mm que chega na flotação, elas tem maior probabilidade de pertencer ao concentrado, já que a flotação de ferro é reversa, do que pertencer ao rejeito. Fato é que, essa ocorrência de sílica acima de 150 mm gerará impactos na qualidade do produto final.

Passando pelos dados simulados em comparação com as especificações de projeto, pode-se pensar em alternativas operacionais para mitigar os impactos no processo. A instalação de um sistema de monitoramento automatizado de medição de tamanho de partículas poderá auxiliar na identificação de geração de partículas acima de 150mm para agilizar as tomadas de decisão para reduzir e/ou evitar quantidade de partículas que venham a comprometer os resultados do processo. A instalação de peneiras fixas, cuja abertura de malha a definir, poderá contribuir na redução de perdas por contaminação por partículas grossas (300mm, 500mm, 1000mm, etc.), já que essa possibilidade existe caso o *apex* de algum dos ciclones de classificação venha a obstruir.

6 SUGESTÃO ESTUDO FUTURO

Como estudo futuro, fica aqui sugerido realizar uma análise comparativa desse trabalho com a operação real da planta de beneficiamento, escolhendo um ou mais cenários, afim de conhecer na prática os resultados de um processo de moagem reversa para o minério de ferro. Além de realizar testes com diferentes tamanhos de corpos moedores, visando a busca de uma moagem mais fina para que o P80 do produto da moagem nos cenários simulados se aproxime do P80 de projeto, de tal forma vindo a proporcionar uma maior liberação mineral, e contribuindo para uma melhor performance no processo de flotação da usina Tico Tico, onde vem demonstrando na fase de *ramp up* a melhor faixa granulométrica com as maiores recuperações metalúrgicas e grau de seletividade um tamanho entre 0,53 mm a 0,75 mm.

7 CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou a simulação de possíveis cenários de alimentação para o circuito de moagem reversa da mina Tico Tico da MMI. Os cenários de alimentação aqui simulados variaram em granulometria, teores de seus principais componentes (ferro e quartzo) e outras especificações técnicas. O blend de minério a ser alimentado na planta de beneficiamento, alterou suas características devido ao aumento da entrada de itabiritos semi-compactos junto ao minério friável. Para comparação foram utilizados os parâmetros de processo da engenharia de projeto para definição da rota de processo, sendo que o cenário 4 foi o blend padrão para alimentação da planta de beneficiamento. Como nenhum processo é estável, outros três possíveis cenários de blend de alimentação foram construídos. O cenário 1,

demonstrou um aumento da carga circulante no circuito da moagem em relação ao cenário projetado, pois provavelmente se deu devido ao aumento no teor de sílica e aumento do A80 na alimentação nova, necessitando assim de um maior fator de redução em relação aos demais cenários analisados, entretanto este aumento de carga circulante não será prejudicial aos parâmetros operacionais da usina, pois estará dentro do fator de projeto dos equipamentos.

A simulação é importante quando não se tem histórico e aplicações práticas para determinados processos. No caso do circuito de moagem reversa integrado a uma classificação por hidrociclones para minério de ferro, sabe-se que já esteve em operação na mina de Germano da Samarco, sendo esse circuito foi alterado por apresentar dificuldades de controle dos processos posteriores e obtenção esperada para o produto final. A simulação da aplicação da moagem reversa na mina Tico Tico da MMI apresentou resultados que, se não houver intervenções no processo para controlar a geração de minerais silicosos de granulometria grosseira, provavelmente, não será obtida a qualidade do produto final e, processos como a deslamagem ficarão sobrecarregados devido a geração de lamas acima do esperado. Fato esse, provavelmente, devido aumento da necessidade de moer ainda mais o minério para reduzir os minerais silicosos, minimizando o carreamento desses minerais com granulometria grosseira.

REFERÊNCIAS

- [1] Freitas, L.S. Avaliação dos minérios itabiritos compactos e semi-compactos em um circuito de britagem da Samarco Mineração S/A, 2014.
- [2] Rosa, A.C. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia “DESEMPENHO DOS CIRCUITOS DE MOAGEM DIRETO E INVERSO DA SAMARCO” p 17.
- [3] GAUDIN, 1939 apud LUZ et al 2010).
- [4] Kelly, E. G. e Spottiswood, D. J. Introduction to mineral processing. New York: John Wiley & Sons, 1982, p.199-236.
- [5] AKW, 2018 – Disponível em: <http://www.akwauv.com/Hidrociclones-AKA-VORTEX-e-distribuidoresradiais-AKA-SPIDER.htm>. Acesso em: 15 Mai. 2018.
- [6] DONDA, J.D. Considerações gerais sobre o Concentrador do Projeto da Terceira Usina de Pelotização (Segundo Concentrador de Germano). In: Relatório Interno - Samarco Mineração S.A., 2005.
- [7] MTI - Mineral Technologies International, Inc. Modsim™ - MODular SIMulator for Mineral Processing Plants, Manual do Usuário, 12a Edição, 2009.
- Carriso, R. C. C. e Correia, J. C. G. Classificação e Peneiramento. In: Luz, A. B.; Sampaio, J. S e Almeida, S. L. M. (Ed). Tratamento de Minérios. 4a ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. p.197-237.
- FLSmith KREBS BRASIL. Simulações do circuito de classificação e deslamagem por meio de Hidrociclones da Mineração Morro do Ipê, Maio 2021.
- Sampaio, J. A; Oliveira, G. P. Silva, A. O. *Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais – CETEM/MCT*; Capítulo 7 – Ensaio de Classificação em Hidrociclones. Rio de Janeiro
- Universidade Federal de Minas Gerais. Projeto de Extensão; Avaliação Sobre a Moagem de Minérios Friáveis e Compactos da Morro do Ipê; Resultados de caracterização e de simulação do circuito de moagem do projeto Tico-Tico para as amostras 2023-2028 e 2029-2047.