

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**  
**Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais**

**MONOGRAFIA**

**Programa de Geometalurgia do Minas Rio - *Anglo American*:**  
**Primeiras análises**

**Aluno: Roberta Gonçalves Resende Ferreira**

**Orientadora: Prof. Andréia Bicalho Henriques**

**Co-Orientador: Prof. Douglas Batista Mazzinghy**

**Dezembro 2018**

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, amor da minha vida, pelo incentivo e apoio em todos os momentos.

Aos professores Andréia Henriques e Douglas Mazzinghy pelo suporte na preparação desse trabalho.

Às Gerências de: Processo e Qualidade, Planejamento a Curto Prazo, Geologia, Processo e Desenvolvimento e Operação de Usina da *Anglo American* Minério de Ferro Brasil pelo trabalho colaborativo desenvolvido ao longo deste ano de estágio.

Aos colegas de trabalho Alexandre Rocha, Denilson Araújo, Fernando Guimarães, Fernando Morais, Luís Cláuzio Machado, Paulo Mapa e Robson Martins por me introduzirem nesse tema e tanto colaborarem com esse trabalho.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	7
2	OBJETIVO.....	8
3	REVISÃO DE LITERATURA .....	9
3.1	CONTEXTO GEOLÓGICO – MINA DO SAPO .....	9
3.2	ANGLO AMERICAN MINÉRIO DE FERRO BRASIL.....	11
3.3	USINA DE BENEFICIAMENTO DO PROJETO MINAS-RIO.....	11
3.4	GEOMETALURGIA.....	12
4	METODOLOGIA .....	16
4.1	EXECUÇÃO DOS TESTES .....	16
4.1.1	FURO DE SONDA .....	17
4.1.2	BRITAGEM .....	18
4.1.3	MOAGEM.....	19
4.1.4	REQUERIMENTO ENERGÉTICO.....	22
4.1.5	DESLAMAGEM.....	24
4.1.6	FLOTAÇÃO.....	26
4.2	MODELO DE BLOCOS .....	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	31
6	CONCLUSÃO .....	40
7	SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTUROS .....	41
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Afloramento de formação ferrífera na Mina do Sapo (Anglo American, 2016) .....	9
Figura 3.2: Mapa Geológico de Curto Prazo (Anglo American, 2016) .....	10
Figura 3.3: Fluxograma da Usina de Beneficiamento da Mina do Sapo .....	12
Figura 4.1: Etapas de caracterização geometalúrgica .....	16
Figura 4.2: Fluxograma Furo de sonda e Britagem .....	17
Figura 4.3: Fluxograma Moagem e Requerimento Energético .....	21
Figura 4.4: Foto “moinho de Donda” .....	23
Figura 4.5: Curva ajustada para “método de Donda” .....	23
Figura 4.6: Fluxograma Deslamagem e Flotação .....	25
Figura 4.7: Foto do sistema de deslamagem .....	26
Figura 4.8: Foto célula de flotação CDC .....	27
Figura 4.9: Relação de variáveis geometalúrgicas estimadas em ensaios de laboratório	29
Figura 4.10: Relação de variáveis geometalúrgicas .....	30
Figura 5.1: Análise química furos de sonda .....	32
Figura 5.2: Distribuição Granulométrica .....	33
Figura 5.3: Gráfico de requerimento energético por litologia das amostras da <i>Anglo American</i> . .....	34
Figura 5.4: Recuperação de alumina na lama .....	35
Figura 5.5: Parâmetro de desempenho da Deslamagem .....	36
Figura 5.6: Resultados do ensaio de flotação em bancada para IF .....	37
Figura 5.7: Visualização em cava do requerimento energético estimado, da recuperação mássica na deslamagem estimada, da recuperação mássica na flotação estimada e do índice de seletividade na flotação estimado. ....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Escala de utilização de dados geometalúrgicos (Lishchuk <i>et al.</i> , 2015) .....	14
Tabela 4.1: Malhas da distribuição granulométrica do furo de sonda.....	18
Tabela 4.2: Malhas da distribuição granulométrica do BRITADO.....	19
Tabela 4.3: Carga de bolas aplicada na moagem.....	20
Tabela 4.4: Condições dos ensaios de previsão de consumo específico de energia na metodologia de Donda (Donda, 2014) .....	24
Tabela 5.1 – Identificação das 35 amostras utilizadas nesse estudo .....	31

## RESUMO

A geometalurgia é uma área que está em crescimento na indústria mineral pois é uma ferramenta utilizada para estudar depósitos e minérios cada vez mais complexos. A *Anglo American* Minério de Ferro Brasil opera uma mina de minério de ferro de baixo teor em Conceição do Mato Dentro. O presente trabalho apresenta as primeiras análises dos resultados do Programa Geometalúrgico do Minas Rio – *Anglo American* para 35 amostras de furos de sondagem que contemplam 5 litologias (IF, IC, AIF, CGM e HM). Foram realizados ensaios de britagem, moagem, requerimento energético, deslamagem e flotação nas 35 amostras. A partir dos resultados dos ensaios, um modelo geometalúrgico cobrindo uma região da lavra de 2019 foi criado permitindo avaliar tridimensionalmente o comportamento das variáveis geometalúrgicas. O atual status do Programa Geometalúrgico desenvolvido na *Anglo American* pode ser classificado como nível 2: Dados de visualização (a variação dentro do corpo de minério). O robustecimento do banco de dados e a contínua avaliação da rota de ensaios estabelecida resultarão na criação de modelos de blocos mais representativos e na criação de modelos matemáticos para estudos de cenários em escala industrial.

Palavras-chave: Geometalurgia, caracterização, ferro.

## ABSTRACT

Geometallurgy is an area that has been developed in the mineral industry because it is a tool to study deposits and minerals more and more complex. *Anglo American Iron Ore Brazil* operates in the mining of low grade iron ore in Conceição do Mato Dentro. This Study undertook the first analyzes of the results of the Geometallurgical Program of Minas Rio - *Anglo American* for 35 samples of drilling holes that include 5 lithologies (IF, IC, AIF, CGM and HM). Crushing, grinding, energy requirements, desliming and flotation tests were carried out on the 35 samples. From the results of the tests, a geometric model covering a region of the field of 2019 was created allowing to evaluate three-dimensional the behavior of the geometalurgical variables. The status of the Geometallurgical Program developed in *Anglo American* can be classified as level 2: Visualization data (the variation within the body of ore). The strengthening of the database and the continuous evaluation of the established testing route will result in the creation of more representative block models and the creation of mathematical models for industrial scale scenarios studies.

Key-words: Geometallurgy, characterization, iron.

## 1 INTRODUÇÃO

A diminuição dos teores de minério, aumento da variabilidade dentro do corpo de minério e a flutuação dos preços das *commodities* têm maior impacto na rentabilidade dos projetos exigindo, conseqüentemente, um nível de conhecimento mais elevado, assim como um planejamento a curto e a longo prazo mais exatos. Uma das soluções é a implementação da geometurgia. A maneira como será feita a estruturação de dados e a modelagem a partir de dados geometúrgicos dependem do propósito do estudo geometúrgico (Lishchuk, 2016).

A Indústria 4.0 é uma tendência que tem o poder de transformar negócios e proporcionar recursos às fábricas para trabalhar de forma mais autônoma, eficiente e adaptável. Nesse contexto, a Geometurgia é uma ferramenta da Mineração 4.0 que possibilita a criação de sistemas integrados de informações. Por meio dessa ferramenta, recursos estratégicos podem auxiliar na tomada de decisão quanto ao melhor aproveitamento de fontes minerais de forma inteligente e sustentável.

A caracterização do minério, a partir de ensaios realizados em escala de laboratório e embasados em técnicas sugeridas pela literatura, fomenta discussões sobre o desempenho operacional e melhor aproveitamento do minério na planta de beneficiamento. Almeja-se, a partir do conhecimento obtido via caracterização, prever o comportamento do minério anteriormente à sua entrada na Usina.

O trabalho aborda as metodologias aplicadas no Programa Geometúrgico da *Anglo American* Minério de Ferro Brasil e apresenta um protótipo de modelo geometúrgico para a área estudada.

Este trabalho é resultado do Programa de Geometurgia da *Anglo American* Minério de Ferro Brasil desenvolvido de forma colaborativa entre as Gerências de Processo e Qualidade, Planejamento a Curto Prazo, Geologia, Processo e Desenvolvimento e Operação de Usina.

## 2 OBJETIVOS

### Objetivo Geral

Apresentar o programa geometalúrgico desenvolvido na *Anglo American* Minério de Ferro Brasil.

### Objetivos Específicos

- Detalhar a metodologia utilizada no programa geometalúrgico da *Anglo American* Minério de Ferro Brasil.
- Apresentar um protótipo de modelo geometalúrgico a partir dos dados estimados no programa geometalúrgico da *Anglo American* Minério de Ferro Brasil.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO – MINA DO SAPO

O modelo geológico-tipológico da Mina do Sapo compreende um conjunto de metassedimentos depositados em uma bacia intra-continental que evoluiu para uma margem passiva. Os sedimentos são compostos por clásticos finos (argilas) e sedimentos químicos onde se incluem as formações ferríferas bandadas economicamente importantes e rochas carbonáticas. (ANGLO AMERICAN, 2016)

Ainda segundo relatório interno (Anglo American, 2016), a formação ferrífera tem cor cinza clara a cinza escura, localmente negra azulada (Figura 3.1), formada por alternância de camadas milimétricas a centimétricas, quartzosas e ferruginosas, ricas em hematita especular e granular e, localmente, magnetita. Corpos ricos aparecem descontinuamente, xistosos e de composição especularítica, com 100m a 250m de comprimento e espessura variando de 10m a 30m. São encontradas intercalações lenticulares de quartzitos brancos, sericíticos, quartzitos cinzentos ferruginosos, hematita-sericita-quartzo xistos/filitos de cor cinza em meio às formações ferríferas bandadas. O Itabirito consiste em uma rocha de formação ferrífera bandada (BIF) fresca, podendo conter veios de quartzo de origem hidrotermal com espessura centimétrica.



Figura 3.1: Afloramento na Mina do Sapo (Anglo American, 2016)

A formação ferrífera bandada (BIF) é dividida no mapa geológico em três litotipos: Itabirito friável (IF), Semi-friável (ISC) e Itabirito (IC), levando-se em conta o grau de intemperismo e compactidade apresentada pelas rochas (Anglo American, 2016).

A figura 3.2 mostra o mapa geológico e os limites entre as litologias que compõem a Mina do Sapo.

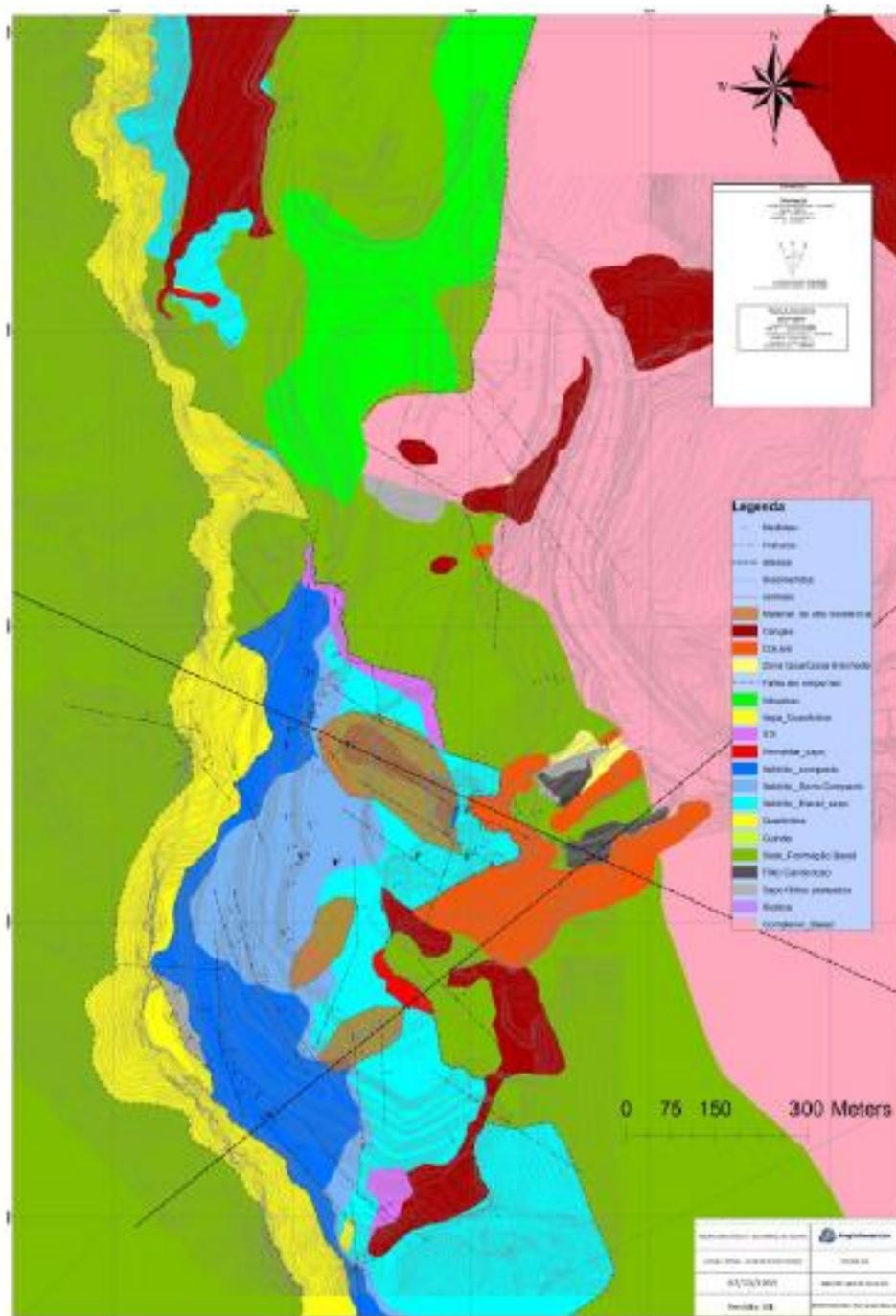


Figura 3.2: Mapa Geológico de Mina do Sapo (Anglo American, 2016)

### **3.2 ANGLO AMERICAN MINÉRIO DE FERRO BRASIL**

A *Anglo American* é uma empresa global de mineração diversificada. O portfólio de operações de mineração de alta competitividade mundial inclui diamantes, cobre, níquel e *commodities* de minério de ferro, manganês, carvão e metais do grupo platina. No Brasil, a *Anglo American* está presente com dois produtos: minério de ferro, com o Minas-Rio, localizado nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, e níquel, com operações nos municípios de Barro Alto e Niquelândia, em Goiás.

O sistema Minas-Rio envolve o desenvolvimento de jazidas de baixo teor de itabirito e hematita na Serra do Sapo, localizada a aproximadamente 200km a nordeste da cidade de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais. Tem como Reserva Inferida aproximadamente 714Mt de Itabirito e Hematita, com teor médio de ferro de 33,4%. Este sistema inclui uma mina a céu aberto (Mina do Sapo) e uma planta de beneficiamento na cidade de Conceição do Mato Dentro, produzindo *pellet feed* de alta qualidade. A operação na Mina do Sapo iniciou em outubro de 2014 e visa uma produção anual de 30,0 Mta (base úmida) de produto *Premium Quality Pellet Feed* através da alimentação de aproximadamente 55Mt de minério de ferro na planta metalúrgica. O concentrado de minério de ferro é transportado através de um mineroduto de 529 km até o Porto do Açu, de onde é exportado.

### **3.3 USINA DE BENEFICIAMENTO DO PROJETO MINAS-RIO**

O fluxograma da unidade de manuseio e beneficiamento de itabiritos está representado na figura 3.3, e consiste das seguintes operações:

- Britagem Primária;
- Britagem Secundária e Peneiramento;
- Pilha pulmão;
- Prensa de rolos;
- Moagem primária e Hidrociclonagem;
- Deslamagem;
- Flotação em células mecânicas;
- Remoagem;

- Espessamento;
- Planta de reagentes.

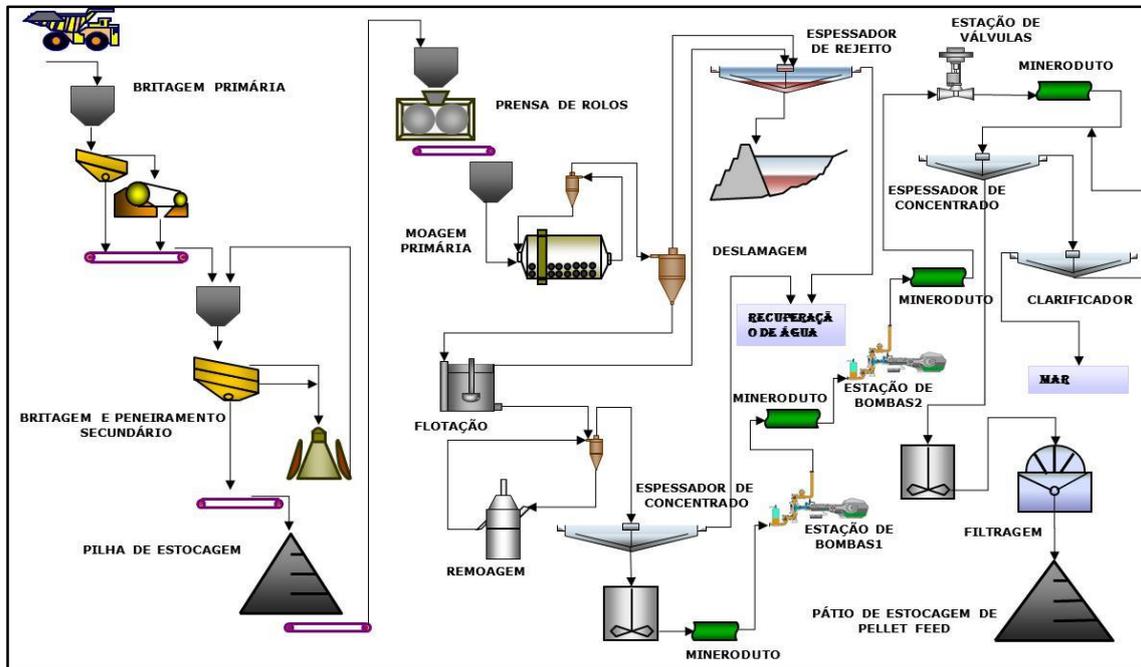


Figura 3.3: Fluxograma da Usina de Beneficiamento da Mina do Sapo (Anglo American, 2016)

No ano de 2017, os teores médios na alimentação da usina foram de 35% de ferro, 47% de sílica e 1% de alumina, com uma produção de 15Mt de *pellet feed*.

### 3.4 GEOMETALURGIA

Uma abordagem clássica para modelar um depósito é realizada por meio da obtenção dos teores do minério a partir de análises químicas e da construção de um modelo de blocos 3D que inclui geologia e química do minério. No entanto, a complexidade dos minérios e depósitos vem aumentando ao longo dos anos e a necessidade por modelos aprimorados tem se tornado essencial (Lishchuk *et al.*, 2015). A geometalurgia originalmente surgiu como uma abordagem multidisciplinar e, nos últimos anos, vários autores propuseram diferentes definições, todas baseadas na integração de informações geológicas, mineralógicas e metalúrgicas (Sola e Harbort, 2012; Lishchuk *et al.*, 2015; Parian *et al.*, 2015).

O programa geometalúrgico é de aplicação industrial e consiste em ações contínuas para aumentar o conhecimento sobre a variabilidade do corpo mineral (propriedades geológicas e de processamento), seus efeitos no processamento dos minérios e seu uso no planejamento e gestão da produção (Lishchuk, 2016).

O desenvolvimento de um banco de dados geometalúrgico é parte integrante da modelagem geometalúrgica. No estágio de definição do programa e de seleção de amostras, uma avaliação inicial deve ser realizada em consulta com os geólogos e engenheiros de minas, levando à seleção de uma rota de teste apropriada. Isso inclui a seleção de amostras que fornecerão representatividade do corpo mineral dentro do plano de mina proposto. A disponibilidade e a qualidade da amostra selecionada também deverão ser umas das principais considerações durante a seleção (Sola e Harbort, 2012).

As características favoráveis de um corpo de minério que exige um modelo geometalúrgico são a alta variabilidade, baixos teores minerais, mineralogia complexa e rotas alternativas de processamento ou métodos de beneficiamento (Lishchuk, 2016). Para Deutsch *et al* (2016) as propriedades metalúrgicas de interesse incluem aquelas que medem produção, recuperação de metais, consumo de energia (índices de cominuição) e consumo de reagentes, entre outros.

Sola e Harbort (2012) apontam que o modelo geometalúrgico confiável exige a geração, integração e interpretação de dados de alta qualidade. Qualquer decisão sólida para um estágio específico de estudo deve ser embasada em informações relevantes e confiáveis. A tomada de decisão a curto prazo requer modelos de alta resolução de propriedades metalúrgicas. (Deutsch *et al.*, 2016).

É necessária uma estrutura unificada que visa integrar a geologia, a mineralogia, o processamento mineral e a metalurgia para construir um modelo espacialmente baseado na gestão da produção que prevê quantitativamente a qualidade dos concentrados e rejeitos, desempenho metalúrgico como recuperações metalúrgicas e rendimento, ou até o impacto ambiental, como uso de água limpa por tonelada produzida (Lishchuk *et al.*, 2015).

Uma escala (Tabela 3.1) pode classificar o nível de uso dos dados geometalúrgicos na mina (Lishchuk *et al.*, 2015)

Tabela 3.1: Escala de utilização de dados geometalúrgicos (Lishchuk *et al.*, 2015)

<b>Níveis</b>	<b>Classificação</b>	<b>Descrição</b>
0	Nenhum	Nem uso nem coleta de dados geometalúrgicos.
1	Coleta de dados	Dados geometalúrgicos são coletados, mas não utilizados.
2	Dados de visualização	Visualização das variáveis geometalúrgicas dentro do corpo de minério.
3	Definir restrições de produção	por exemplo, teor de corte.
4	Previsão de produção	t/h produzidas com viés geometalúrgico
5	Fazer mudanças no processo com base na qualidade da alimentação.	Mudanças são feitas previamente no processo com o conhecimento da geometalurgia.
6	Planejamento de produção	Sequenciamento de lavra
7	Aplicação de diferentes cenários de produção	Dados geometalúrgicos são usados para tomar decisões em larga escala do futuro por exemplo, quando investir, quais tecnologias alternativas são selecionadas, etc.

A aplicabilidade de estudos geometalúrgicos é ampla. Rodrigues e Brandão (2017) citam em seu estudo que a classificação dos minérios quanto a compacidade baseada apenas na estratificação granulométrica não traz relação direta à resistência a cominuição. Além disso, destacam que os valores de grau de liberação para o retido em 150 $\mu$ m demonstraram ser menores quanto maiores os valores de requerimento energético e vice-versa.

Rodrigues *et al.* (2014) introduziram os dados dos testes de determinação do tempo de moagem (DTM), dados de composição mineralógica, de classificação baseada no retido em 9,5mm e da composição química nas amostras de furos de sonda no modelo geológico-tipológico pré-existente. Então foi desenvolvido um modelo matemático para o cálculo do requerimento

energético do minério na moagem, fornecendo a previsão do consumo específico de energia para os moinhos industriais da mina de Alegria Norte da Samarco Mineração S.A.

Já em seu estudo, Parian *et al.* (2015) usam vários tipos de amostras de minério de ferro para investigar um novo método para estimar teores minerais. O método sugerido combina duas técnicas de caracterização: difração de raio-X e o método de conversão do elemento-mineral, e supera as limitações específicas de cada uma das técnicas quando empregadas individualmente. Os resultados desse novo método foram aplicados na geometalurgia em seu estudo de caso.

Uliana (2018) aponta em seu estudo a possibilidade de realizar correlações geometalúrgicas através de ensaios laboratoriais relativamente simples, exemplificando a aplicabilidade na operação unitária de deslamagem de um minério de ferro itabirítico da Samarco Mineração S.A. Por sua vez, sugere que uma representativa amostragem deve ser realizada, de forma a proporcionar uma melhor aplicabilidade do modelo geometalúrgico proposto aos circuitos industriais já instalados e aos materiais à serem futuramente processados.

Na descrição de Parian *et al.* (2015), o projeto geometalúrgico é como uma aplicação da geometalurgia como uma forma de mapear a variação do corpo mineral e prever a desempenho metalúrgico em um nível espacial. Além disso, o projeto compreende a aplicação de uma informação geológica complexa e a transfere para domínios geometalúrgicos para serem usados na melhoria do processo, no planejamento de produção e na tomada de decisões de negócio.

Quanto mais profundo for o nível de geometalurgia, maior integração e cooperação entre as partes envolvidas na cadeia de produção mineral (exploração, exploração, processamento, produção industrial, vendas, etc.) (Lishchuk *et al.*, 2015) e mais revelador se torna o estudo.

## 4 METODOLOGIA

Primeiramente, uma base de dados litoquímicos contendo 35 amostras foi gerada por meio de agrupamento de intervalos de 19 furos de sonda diamantada pertencentes a cava do ano de 2019. À esta base contendo 35 amostras foram associados os resultados dos ensaios de caracterização realizados em laboratório.

A classificação litológica foi realizada pela equipe da Geologia por meio de inspeção visual, mas também leva em consideração a análise química de cada amostra, principalmente os teores de ferro, alumina e fósforo. As litologias estimadas nesse trabalho foram: Itabirito Friável (IF), Itabirito friável com alto teor de alumina (AIF), Itabirito Compacto (IC), Canga mineralizada (CGM) e Hematita (HM) (*Anglo American, 2016*).

### 4.1 EXECUÇÃO DOS TESTES

Todas as 35 amostras oriundas do agrupamento de intervalos de testemunhos de sondagem foram encaminhadas para caracterização em escala de bancada, sendo realizados ensaios de britagem, moagem, deslamagem e flotação.

A partir dos ensaios, obteve-se: análise granulométrica do furo de sonda (séries grossa, intermediária e fina da sequência de peneiras da série Tyler), análises químicas do furo de sonda, alimentação (underflow da deslamagem), concentrado final e rejeito da flotação.

Todas as análises granulométricas foram realizadas em peneirador suspenso com peneiras redondas de 20cm de diâmetro. Realizou-se a análise granulométrica através de um conjunto de peneiras com razão entre aberturas consecutivas igual a  $\sqrt{2}$ .

As etapas de caracterização adotadas neste trabalho estão resumidas na figura 4.1.

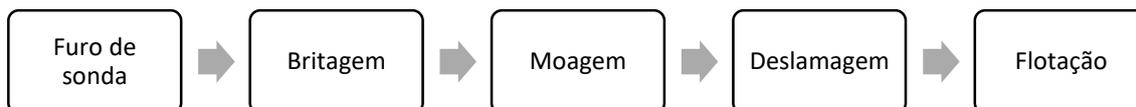


Figura 4.1: Etapas de caracterização geometalúrgica

#### 4.1.1 FURO DE SONDA

O fluxograma (apresentado na figura 4.2) descreve a primeira etapa de caracterização do material. Nessa primeira etapa, obteve-se a distribuição granulométrica do material tal qual e depois de ser britado.

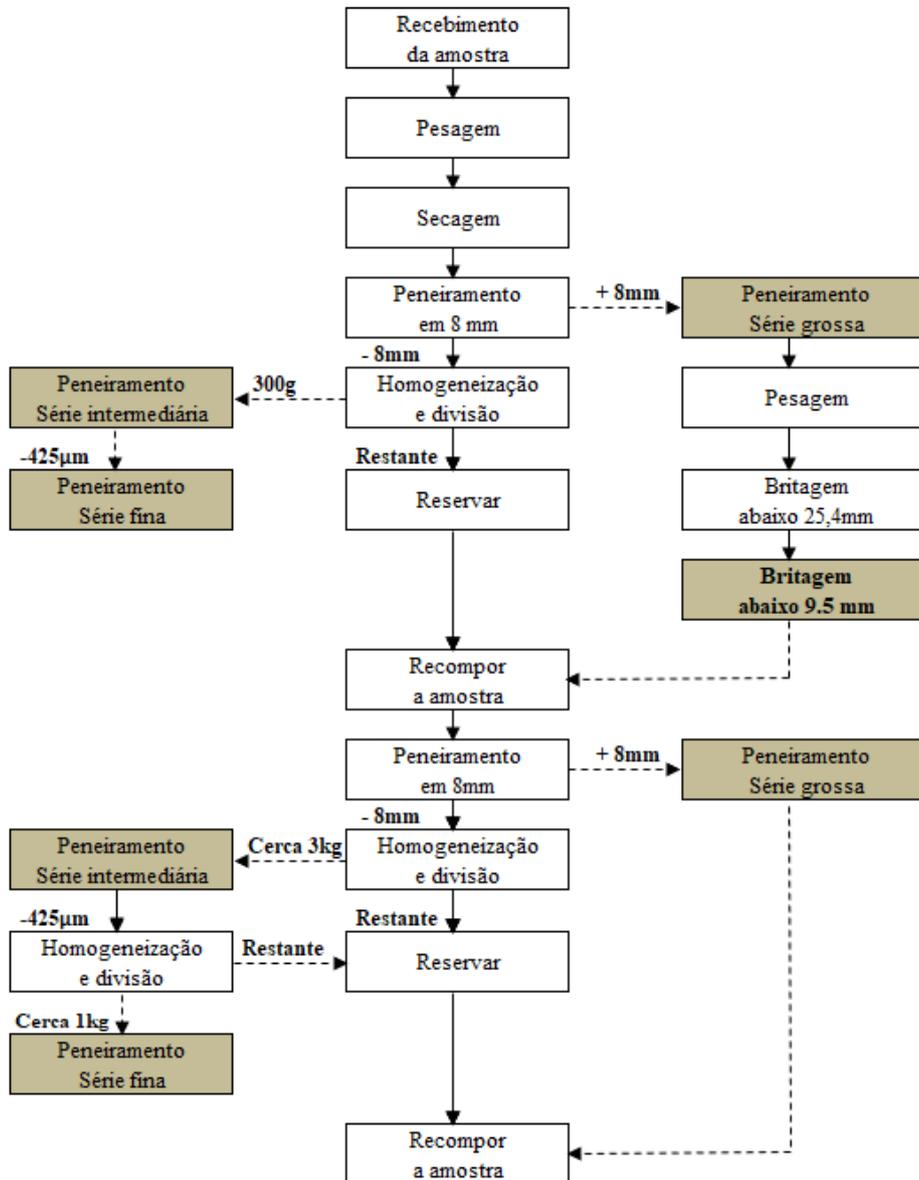


Figura 4.2: Fluxograma Furo de sonda e Britagem

Inicialmente a amostra foi seca e pesada. Em sequência, passou por um peneiramento em 8mm, em que o retido nessa faixa seguiu para o peneiramento na SÉRIE GROSSA partindo da malha de 152,4mm até 8,0mm, sendo empregadas um total de nove peneiras para essa série. Após

homogeneização e divisão do passante em 8mm, coletou-se uma alíquota de 300 gramas para dar sequência ao peneiramento na SÉRIE INTERMEDIÁRIA iniciando a série de peneiras em 6,35mm até 0,425mm. Foram empregadas nove faixas de peneiras para esse intervalo. Já na SÉRIE FINA, o passante em 0,425mm deu sequência ao peneiramento iniciado em 300 $\mu$ m até <38 $\mu$ m, tendo sido empregadas nove faixas de peneiras para esse intervalo. O resultado das três séries de peneiramentos foi a distribuição granulométrica do que denominamos FURO DE SONDA.

A tabela 4.1 apresenta as malhas correspondentes à cada série de classificação.

Tabela 4.1: Malhas da distribuição granulométrica do furo de sonda

<b>Distribuição Granulométrica - FURO DE SONDA</b>									
<b>Série Grossa (<math>\mu</math>m)</b>	152400	127000	101600	75000	50000	25000	12700	9500	8000
<b>Série Intermediária (<math>\mu</math>m)</b>	6350	4750	3350	2360	1700	1180	850	600	425
<b>Série Fina (<math>\mu</math>m)</b>	300	212	149	105	74	53	44	38	<38

#### 4.1.2 BRITAGEM

Foi utilizado um britador de mandíbulas TM8 para a realização da britagem primária e secundária. Na britagem primária, toda a amostra oriunda do peneiramento em série grossa do FURO DE SONDA foi pesada e britada a 25,4mm. A abertura na posição fechada (APF) adotada foi de 25,4mm. Em sequência, na britagem secundária, toda a amostra (produto da britagem primária) foi britada a 9,5mm. A abertura na posição fechada (APF) adotada foi 9,5 mm.

O produto da britagem secundária passou por uma sequência de peneiramentos semelhante à sequência descrita para obtenção da distribuição granulométrica do furo de sonda. A SÉRIE GROSSA contemplou o peneiramento do material retido em 8,0mm (malhas: 12,7mm, 9,5mm, 8,0mm). Já na SÉRIE INTERMEDIÁRIA, após homogeneização e divisão do passante em 8mm, coletou-se uma alíquota de 3kg para dar sequência ao peneiramento iniciando a série de peneiras em 6,35mm até 0,425mm. Foram empregadas nove faixas de peneiras nesse intervalo. O material passante em 0,425mm passou por homogeneização e divisão e em seguida retirou-

se uma alíquota de 1kg para peneiramento na SÉRIE FINA. A série de peneiras foi de 300 $\mu$ m até <38 $\mu$ m, tendo sido empregadas nove faixas de peneiras para esse intervalo. O resultado das três séries de peneiramentos foi a distribuição granulométrica do que denominamos BRITADO. A tabela 4.2 apresenta as malhas correspondentes à cada série de classificação do britado.

Tabela 4.2: Malhas da distribuição granulométrica do BRITADO

<b>Distribuição Granulométrica - BRITADO</b>									
<b>Série Grossa (<math>\mu</math>m)</b>	12700	9500	8000						
<b>Série Intermediária (<math>\mu</math>m)</b>	6350	4750	3350	2360	1700	1180	850	600	425
<b>Série Fina (<math>\mu</math>m)</b>	300	212	149	105	74	53	44	38	<38

### 4.1.3 MOAGEM

Na figura 4.3 estão representadas as etapas do fluxograma de caracterização de moagem e requerimento energético.

Das amostras reservadas, produtos tanto do passante em 8,0mm quanto em 0,425mm, após homogeneização e divisão, foram retiradas duas alíquotas: uma para seguir o fluxo da moagem e outra para seguir o fluxo do estudo de requerimento energético. A alíquota separada para o ensaio de moagem, após ser britada a 2mm, foi homogeneizada e quarteada para a retirada de 5 alíquotas que alimentaram o circuito de moagem. O objetivo desse ensaio foi produzir material com P80 abaixo de 125 $\mu$ m e em quantidade suficiente para alimentar o circuito de flotação.

O produto da moagem alimentou o circuito de deslamagem/flotação sendo necessários cerca de 10kg do material moído para as próximas etapas.

Foi utilizado um moinho de bolas 0,304m x 0,232m para a moagem. A velocidade de rotação foi ajustada em 67 RPM, o percentual de sólidos empregado foi de 70% em massa e uma alimentação de aproximadamente 3,4kg. A carga de bolas adotada segue uma distribuição de equilíbrio conforme na tabela 4.3

Tabela 4.3: Carga de bolas aplicada na moagem

<b>Corpo Moedor Diâmetro (mm)</b>	<b>Quantidade de bolas (%)</b>
<b>40</b>	3,1%
<b>35</b>	28,1%
<b>30</b>	8,3%
<b>25</b>	49,0%
<b>20</b>	11,5%

No fluxograma de caracterização é realizado o ensaio de DTM (determinação do tempo de moagem) considerando a especificação de 10% retido na malha de 150 $\mu$ m. O procedimento também é realizado nas condições citadas anteriormente. A amostra é quarteada de forma a obter três alíquotas. Uma das alíquotas foi moída em 600s, a segunda alíquota foi moída em um tempo maior ou menor, dependendo do resultado do primeiro teste. Foi realizada análise do retido mássico em 150 $\mu$ m na alíquota da amostra sem estar moída (tempo zero) e para as duas alíquotas moídas nos respectivos tempos (T1 e T2). Os resultados são apresentados em um gráfico, onde no eixo das ordenadas estão as percentagens retidas em 150 $\mu$ m e no eixo das abscissas estão plotados os tempos de moagem. Pela curva gerada foi possível calcular o tempo necessário para obter 10% retido em 150 $\mu$ m. (Rodrigues *et al.*, 2014)

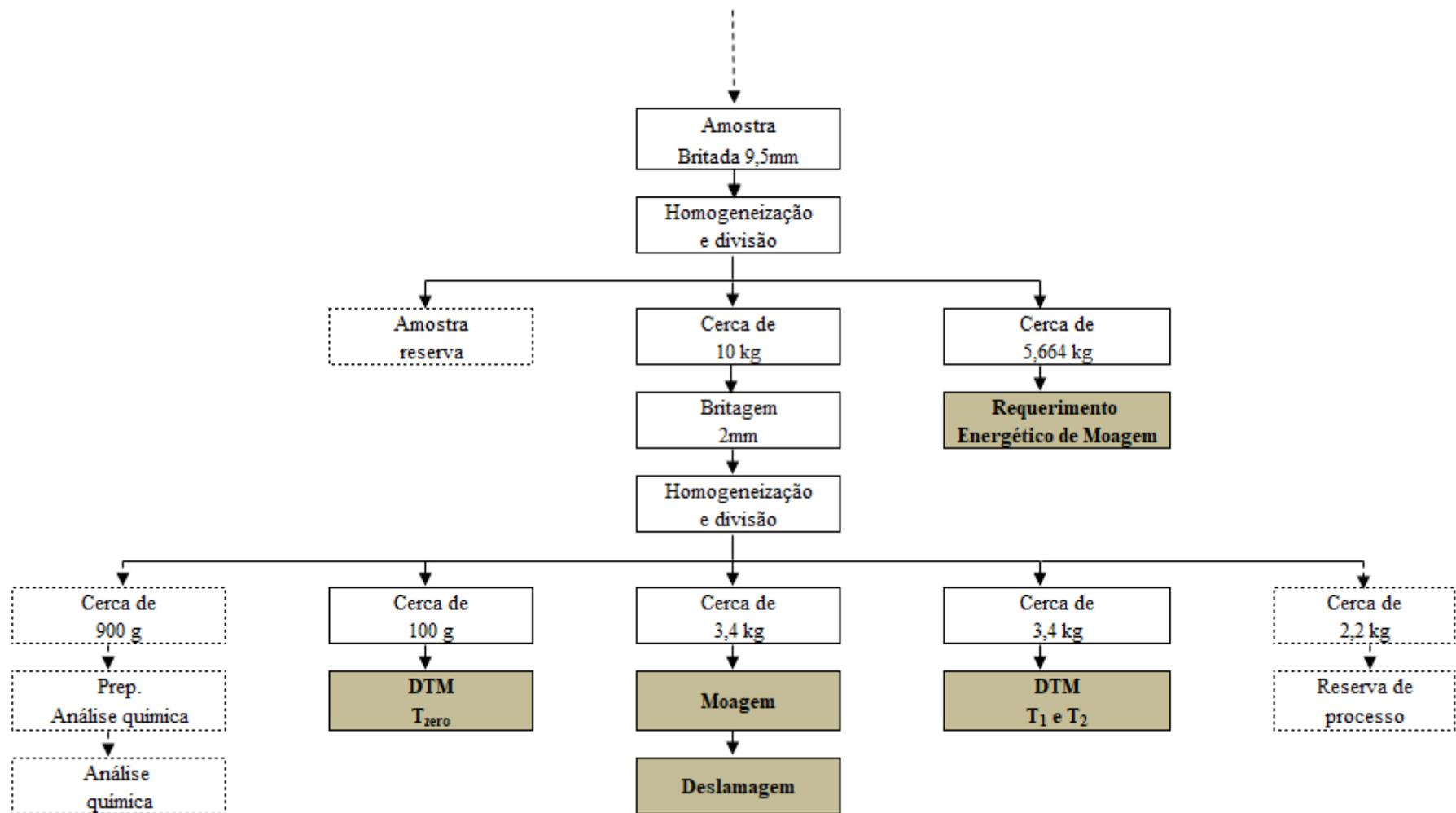


Figura 4.3: Fluxograma Moagem e Requerimento Energético

#### 4.1.4 REQUERIMENTO ENERGÉTICO

Rosa (2012) apresenta uma metodologia desenvolvida na Samarco para previsão de consumo específico de energia para moagem primária que vinha sendo estudada desde 1995. O objetivo era desenvolver um ensaio simples e de rápida execução, mas também utilizando pouca massa de amostras de furos de sondagem com intuito de possibilitar estudos geometalúrgicos.

Ainda em Donda (2014) essa mesma metodologia é apresentada em detalhes assim como mostra resultados com uma variação média em relação aos resultados obtidos industrialmente de 2% e de no máximo 10%. Por se mostrar um método bastante acurado foi empregado para previsão de consumo específico de energia para estudos geometalúrgicos do minério da Mina do Sapo.

O método consiste em efetuar moagens em diferentes tempos, em condições padronizadas, convertendo-se tempo em consumo específico de energia. O parâmetro  $K$  obtido nos ensaios e de acordo com Donda (2014) é característico do minério para a malha de interesse, naquela condição específica de moagem. A equação (1) é adotada para o cálculo:

$$R_p = R_f * e^{-(K.E)} \quad (1)$$

Onde:

$R_p$  = porcentagem retida na malha de interesse do produto

$R_f$  = porcentagem retida na malha de interesse da alimentação

$K$  = parâmetro característico do minério para a malha de interesse (t/kWh)

$E$  = Energia específica (kWh/t)

Na etapa de caracterização (figura 4.3) para estudo do requerimento energético de cada uma das amostras empregou-se a metodologia de Donda (Donda, 2014) utilizando aproximadamente 6kg. Na execução dos ensaios foi utilizado moinho 0,305m x 0,305m (figura 4.4) e amostras 100% passante em 9,53mm. A amostra foi quarteada de forma a se obter 5 alíquotas. Uma delas foi referente ao tempo zero e as outras quatro alíquotas foram moídas em tempos distintos. Em todas as alíquotas foi analisado o retido mássico em 150 $\mu$ m.



Figura 4.4: Foto “moinho de Donda”

Obteve-se a energia necessária para atingir a mesma porcentagem (10%) passante em 150 $\mu$ m através de uma curva exponencial ajustada, conforme gráfico da figura 4.5. A previsão do consumo em laboratório foi feita elaborando-se a curva de porcentagem retida em 150 $\mu$ m *versus* consumo específico de energia.

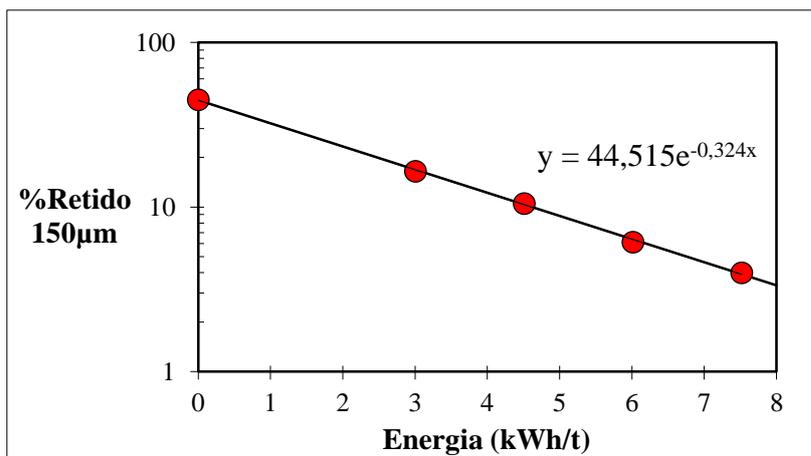


Figura 4.5: Curva ajustada para “método de Donda”

As condições de moagem para estudo do consumo específico de energia das amostras são apresentadas na Tabela 4.4:

Tabela 4.4: Condições dos ensaios de previsão de consumo específico de energia na metodologia de Donda (Donda, 2014)

<b>Parâmetro</b>	<b>Condição estabelecida</b>		
<b>Diâmetro do moinho (m)</b>	0,3048		
<b>Comprimento (m)</b>	0,3048		
<b>Peso da carga (kg)</b>	27,88		
<b>% velocidade crítica</b>	77		
<b>Potência (kW) no eixo do pinhão</b>	0,1022		
<b>Rotação (rpm)</b>	53,50		
<b>% de sólidos em peso</b>	80		
<b>Peso do minério (kg)</b>	5,66		
<b>Tipo de corpo moedor</b>	Bolas		
	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>%</b>	<b>Peso (kg)</b>
<b>Distribuição de carga</b>	63,5	35,7	10,00
	50,8	41,3	11,50
	38,1	13,4	3,72
	31,75	4,9	1,37
	25,4	4,8	1,33

#### 4.1.5 DESLAMAGEM

Na figura 4.6 estão representadas as etapas do fluxograma de caracterização de deslamagem e flotação.

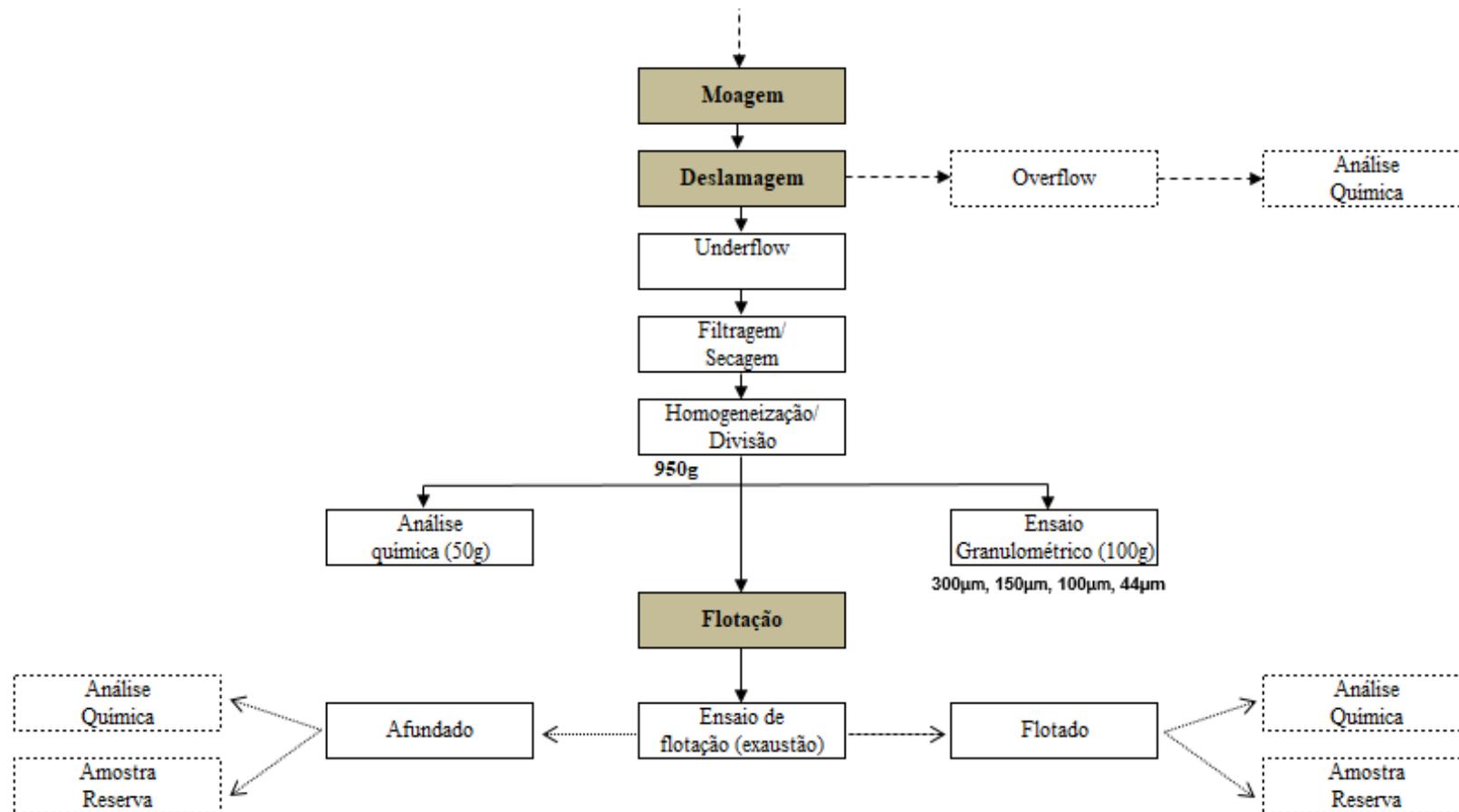


Figura 4.6: Fluxograma Deslamagem e Flotação

No presente estudo, o minério moído foi submetido à deslamagem para retirada da fração ultrafina ( $< 10\mu\text{m}$ ). O processo de deslamagem representado na figura 4.7 foi feito em dois intervalos pelo método de decantação em pH 10,5. Todo o minério foi colocado em um balde de 10 litros e em seguida a polpa (minério mais água) foi agitada por 5 minutos até que estivesse em suspensão. Esperou-se 5 minutos para decantação do material para em seguida sifonar o sobrenadante (*overflow*). O procedimento foi repetido mais uma vez, completando o volume com água deionizada. A sifonação da lama foi feita com o auxílio de uma mangueira, mantendo-a próxima a interface do material sedimentado (Roberto, 2010).

Os produtos da deslamagem, *underflow* e *overflow*, foram filtrados, pesados e homogeneizados para a retirada de alíquotas para submeter a análise química. O *underflow* foi encaminhado para o teste de flotação.



Figura 4.7: Foto do sistema de deslamagem

#### 4.1.6 FLOTAÇÃO

Os ensaios de flotação catiônica reversa foram realizados em escala de bancada (apenas etapa *Rougher*) em célula mecânica marca CDC (figura 4.7) em cuba de 4,5L, 2,5L/min de aeração e rotor fechado com rotação de 1200 RPM. Como reagentes da flotação foram utilizados o amido de milho gelatinizado com soda cáustica como depressor dos minerais de ferro, dosagem de

1450g/t de %Fe, e amina como coletor de ganga, dosagem 150g/t de %SiO<sub>2</sub>. Em todos os testes foi utilizada água deionizada, pH em 9,5 e percentual de sólidos de 40%. Os tempos de condicionamento dos reagentes foram 5,0 minutos para o depressor amido e 1,0 minuto para o coletor amina. Dos concentrado e rejeito obtidos, foram encaminhadas uma alíquota de cada para análise química (Roberto, 2010).



Figura 4.8: Foto célula de flotação CDC

Procedimento:

1. Adicionou 1600g de minério de ferro na cuba com capacidade de 3,5L e acrescentou parte da água que completa o volume da cuba, suficiente para a formação da polpa. A água não adicionada nesta etapa foi utilizada para a adição completa dos reagentes nas etapas seguintes.
2. O rotor foi ligado para iniciar a agitação da polpa e permitir boa homogeneização.
3. Ajustou-se a rotação.
4. Realizou-se a medição do pH inicial.
5. O agente depressor foi adicionado e o recipiente foi lavado com água para garantir a completa adição do reagente. O pH foi medido e anotado após a adição do depressor e ajustou-se o pH para o pH de flotação.
6. Cronometrou-se cinco minutos após a adição do depressor. O agente coletor foi adicionado, tomando o cuidado ao lavar o recipiente para garantir que todo o reagente fosse adicionado. Cronometrou-se um minuto após a adição do coletor.
7. A válvula de aeração foi aberta e o motor das pás de coleta da espuma foi ligado.

8. Acompanhou-se a flotação e solução de reposição (com o pH de flotação) foi adicionada quando o nível da polpa baixou devido à retirada da espuma. O pH da flotação foi medido e anotado.
9. Cronometrou-se o tempo gasto na flotação.
10. Ao final, o pH final da flotação foi anotado.
11. Recolheu-se o flotado. As pás de flotação foram limpas e o líquido da cuba foi vertido em uma bandeja, com cuidado para não arrastar o concentrado no fundo da cuba. Recolheu-se o flotado na parte superior do rotor após o concentrado já ter sido recolhido.
12. Recolheu-se o concentrado. O concentrado depositado nas pás do rotor também foi recolhido.
13. O flotado e concentrado foram filtrados e secos, levando as bandejas para estufa a 105°C por um dia.

Classicamente, além da recuperação metalúrgica o índice de seletividade pode ser usado com o intuito de avaliar o desempenho da flotação em bancada. Esse índice é expresso na equação 2.

$$IS = \sqrt{\frac{R_{Fe}}{R_{SiO_2}} \times \frac{(1-R_{SiO_2})}{(1-R_{Fe})}} \quad (2)$$

Onde:

$R_{Fe}$ =Recuperação metalúrgica de ferro

$R_{SiO_2}$ =Recuperação metalúrgica de sílica

As variáveis geometalúrgicas estimadas a partir desses 5 ensaios laboratoriais relativamente simples estão reunidas na figura 4.9.

<b>FURO DE SONDA</b>
• d80 FURO ( $\mu\text{m}$ )
<b>BRITAGEM</b>
• d80 Briatado ( $\mu\text{m}$ )
<b>MOAGEM</b>
• Requerimento Energético kWh/t (P90 e P98); • DTM (s)
<b>DESLAMAGEM</b>
• Recuperação Mássica (%); • Recuperação Ferro (%)
<b>FLOTAÇÃO</b>
• %Fe alimentação; • %SiO <sub>2</sub> Concentrado; • %Fe Rejeito; • Recuperação Mássica (%); • Recuperação Metalúrgica (%); • Índice de Seletividade.

Figura 4.9: Relação de variáveis geometalúrgicas estimadas em ensaios de laboratório

## 4.2 MODELO DE BLOCOS

O trabalho é resultado da colaboração das equipes de Geologia, Planejamento e Processo.

Primeiramente, em uma malha de 100x100 foram realizados 19 furos diamantados. Foram coletadas 35 amostras nesses furos gerando uma base de dados litoquímicos contemplando 5 tipos litológicos. A base geoestatística de dados foi elaborada onde as 35 amostras foram divididas em intervalos de 5,0 metros, pois o tamanho original das amostras variava entre 2,0 a 20,0 metros.

Segundo Pérez-Barnuevo *et al.* (2018) a proposta do modelamento com propósito geometalúrgico é compor modelos de blocos com indicadores de comportamento metalúrgico esperado para cada bloco. Qualquer indicador que venha a explicar como o comportamento do minério impacta no desempenho do processamento é adequado para ser considerado um indicador geometalúrgico.

Comumente, o armazenamento da informação espacial e do resultado em blocos distintos é chamado de modelo de blocos. O modelo geometalúrgico representa uma interpolação das amostras geometalúrgicas/geológicas em um modelo de blocos tridimensional. Cada bloco

pode armazenar dados geológicos, composicionais químicos, geotécnicos, geomecânicos, informações geofísicas, metalúrgicas e outras informações relevantes. (Lishchuk, 2016).

A equipe da Gerência de Planejamento a Curto Prazo foi a responsável por elaborar o protótipo geometalúrgico que consta nesse trabalho. Foi utilizada a estimativa por krigagem ordinária para as variáveis geometalúrgicas a partir do variograma da variável principal teor de ferro. As variáveis geometalúrgicas que podem ser representadas em modelo de blocos estão descritas na figura 4.10.

<b>Variável</b>	<b>Descrição</b>
<b>P90</b>	Energia requerida para se alcançar 10% retido em 150 $\mu$ m (moagem)
<b>P98</b>	Energia requerida para se alcançar 2% retido em 150 $\mu$ m (moagem)
<b>%RM Deslamagem</b>	Recuperação mássica na deslamagem
<b>%RM Flotação</b>	Recuperação mássica na flotação
<b>%SiO<sub>2</sub> Concentrado</b>	teor de sílica no concentrado da flotação
<b>%Fe Rejeito</b>	Teor de ferro no rejeito da flotação
<b>IS</b>	Índice de Seletividade na flotação

Figura 4.10: Relação de variáveis geometalúrgicas

Segundo Landim e Sturaro (2002) o problema geral a ser resolvido pela técnica de krigagem é fornecer a melhor estimativa de um ponto ou bloco de teor desconhecido a partir de um conjunto de amostras obtidas na amostragem. Landim e Sturaro (2002) destacam que a krigagem ordinária considera a média flutuante ou móvel por toda a área em estudo.

Em suma, a aplicação do método de krigagem ordinária para as variáveis citadas acima levando-se em conta a continuidade espacial em diferentes distâncias e direções, possibilitou a geração da distribuição espacial das variáveis geometalúrgicas cobrindo uma região de lavra do ano de 2019. Por fim, foi realizada a validação visual nas seções onde passam os furos comparando os resultados estimados nos blocos com os valores das amostras.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O trabalho é resultado da colaboração das Gerências de Geologia, Planejamento a Curto Prazo e Processo e Qualidade. As amostras selecionadas (tabela 5.1) correspondem a cinco diferentes litologias da Mina do Sapo.

Tabela 5.1 – Identificação das 35 amostras utilizadas nesse estudo

Amostra	Litologia	Amostra	Litologia
1	AIF	12	IF
2	AIF	13	IF
3	CGM	14	IF
4	CGM	15	IF
5	CGM	16	IF
6	CGM	17	IF
7	HM	18	IF
8	HM	19	IF
9	HM	20	IF
10	IC	21	IF
11	IC	22	IF
35	ISC	23	IF
		24	IF
		25	IF
		26	IF
		27	IF
		28	IF
		29	IF
		30	IF
		31	IF
		32	IF
		33	IF
		34	IF

Pelo fato de ter apenas uma amostra do tipo “ISC”, essa não foi representada graficamente e foi englobada como “IF” na elaboração do protótipo geometalúrgico. A partir das representações gráficas foi possível observar algumas tendências, principalmente avaliar diferenças entre as litologias e entre amostras de uma mesma litologia.

Na figura 5.1 encontra-se a composição química, teor de ferro e alumina, do furo de sonda de cada uma das amostras desse estudo. É notável que as amostras de minérios friáveis (IF)

apresentaram uma variabilidade elevada quanto ao %Fe, cujo desvio em torno da média é de 7,13%. O teor mais baixo em IF foi de 32,5% de ferro. As duas amostras de minérios compactos (IC), cujo teor médio de ferro é de 27,3%, representam um minério significativamente mais pobre quando comparado aos teores médios das demais amostras/litologias. Os minérios de Canga (CGM) e Hematita (HM) apresentaram teores de ferro mais elevados, acima de 50% de ferro, por sua vez teores de contaminantes também muito elevados. Contaminantes como %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e %P em CGM apresentam teores médios de 1,51% e 0,15% respectivamente, sendo que o teor de máximo aceitável para fósforo é de 0,07%.

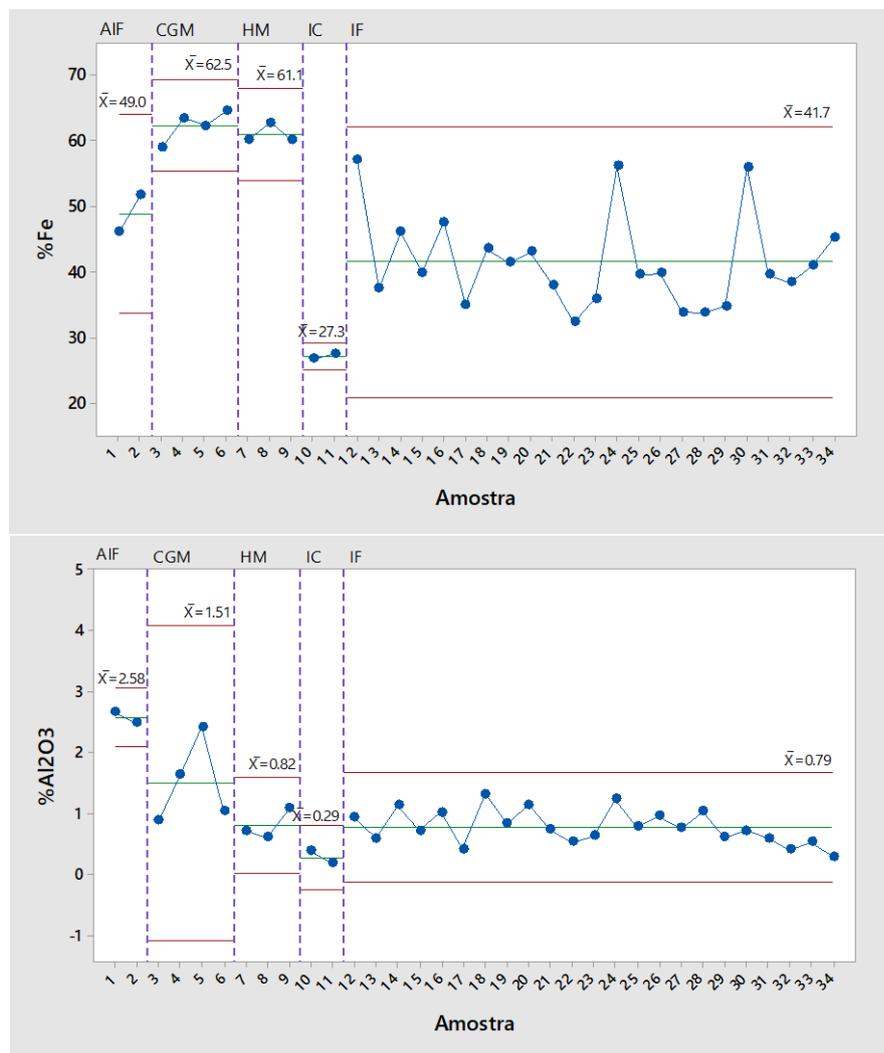


Figura 5.1: Análise química furos de sonda

A curva granulométrica do furo de sonda “IF Estudo” foi projetada a partir da classificação granulométrica obtido na primeira etapa do fluxograma geometalúrgico. Como pode ser observado na tabela 5.1, a grande maioria das amostras são do tipo “IF” (um total de 23

amostras) e por isso apenas essa litologia está representada no gráfico junto às curvas granulométricas do histórico de outras litologias. Observa-se que as litologias apresentam diferentes graus de “compacidade” ao se comparar a distribuição granulométrica das amostras de IF recentemente estudadas com as demais séries representadas. As litologias IC e ISC são mais grossas em relação ao IF e o mesmo se repete ao se comparar o histórico de IF ao IF recentemente estudado, sendo o IF recentemente estudado ligeiramente mais fino. Tal comparação se torna mais evidente ao observar onde a reta P80 cruza cada curva granulométrica (figura 5.2).

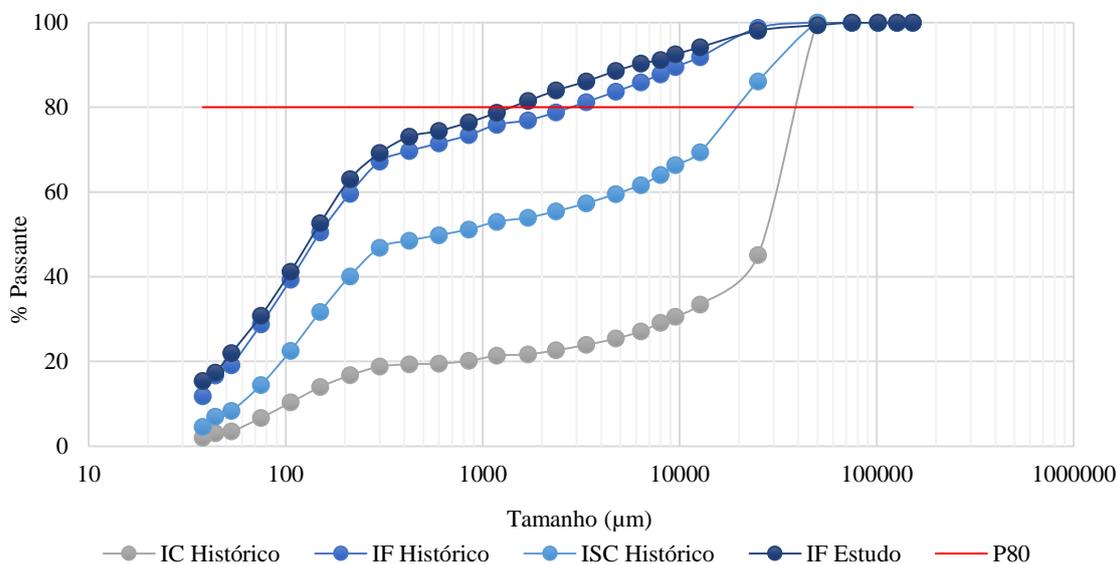


Figura 5.2: Distribuição Granulométrica

Conforme evidenciado em Rodrigues e Brandão (2017) em referência ao conceito de eficiência energética, intuitivamente, os minérios friáveis tendem a apresentar valores de requerimento energético menores na moagem do que os minérios compactos e semi-compactos. Na figura 5.3, as amostras de minérios friáveis (IF) apresentaram valor médio de requerimento energético da ordem de 4,79kWh/t enquanto que as amostras de minérios compactos (IC), ainda que representados por apenas duas amostras, apresentaram valor médio de 6,98kWh/t para a especificação de moagem de 10% retido em 150µm. As duas amostras de minérios friáveis ricos em alumina (AIF) apresentaram valor de requerimento energético semelhantes aos de materiais friáveis (IF), porém com uma média substancialmente menor.

Dentre as amostras de minérios friáveis (IF) há um desvio de 1,08 em torno da média de requerimento energético. Rodrigues e Brandão 2017) destacaram que para o entendimento do comportamento do minério nas etapas de cominuição, além da granulometria, a composição mineralógica, a trama e textura da rocha são fatores determinantes. Ao correlacionar o %passante nas malhas empregadas no peneiramento à variável resposta “requerimento energético”, observa-se que as malhas que apresentaram maiores correlações estão no intervalo 105µm a <38µm. Tanto a distribuição granulométrica do material tal qual “furo de sonda” quanto o produto da britagem “Brit” têm influência sobre o consumo específico de energia na moagem como representado na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Correlação entre distribuição granulométrica e requerimento energético

Malha/Etapa	74 Brit	53 Brit	44 Brit	53 Furo	74 Furo	38 Brit	44 Furo	38 Furo
Correlação	-0,747	-0,734	-0,720	-0,687	-0,685	-0,675	-0,673	-0,663

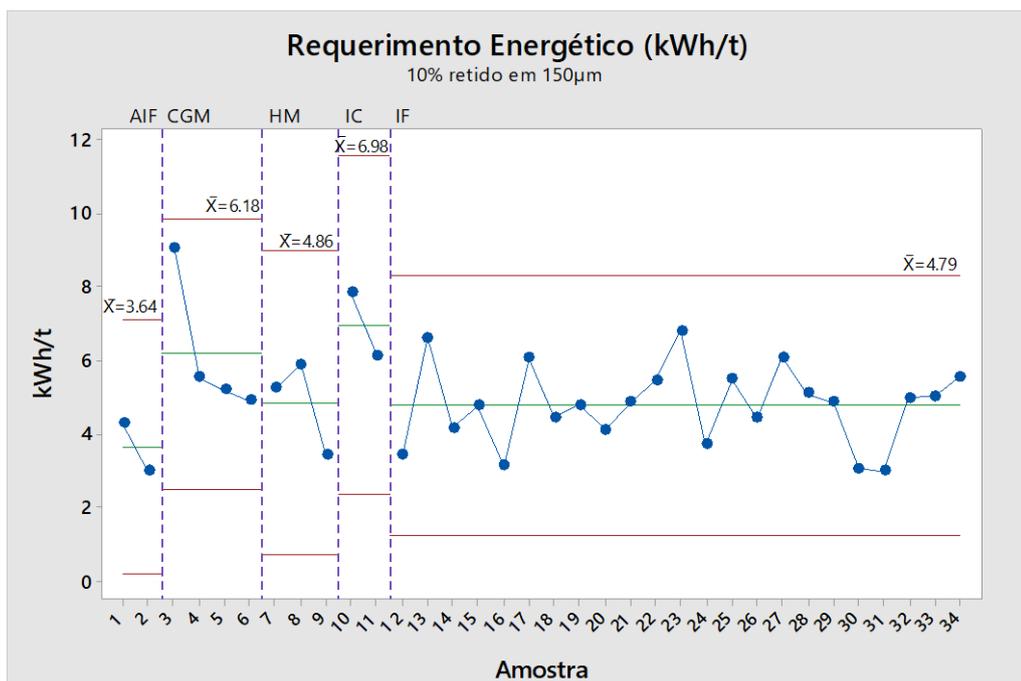


Figura 5.3: Gráfico de requerimento energético por litologia

Para Uliana (2018), além da recuperação mássica, outras variáveis importantes aos estágios de classificação podem ser medidas. Ainda segundo Mapa (2006), o *slime coating*, define-se pelo recobrimento de mineral(is) útil(eis) por partículas finas e/ou ultrafinas e que interferem na interação dos minerais a serem flotados com o coletor e/ou com bolhas de ar. Tendo por objetivo a eliminação de partículas inferiores a 10µm, já que esta variável é de considerável influência

nas etapas subsequentes de flotação (Uliana, 2018), o %passante em  $<45\mu\text{m}$  situou-se em 0,01% demonstrando a efetividade dos ensaios laboratoriais de deslamagem.

Conforme Mapa (2006) as operações de classificação a úmido favorecem a remoção das lamas argilosas, onde se concentram as impurezas indesejáveis, principalmente fósforo e alumina. A figura 5.4 quantifica a alumina recuperada pela lama.

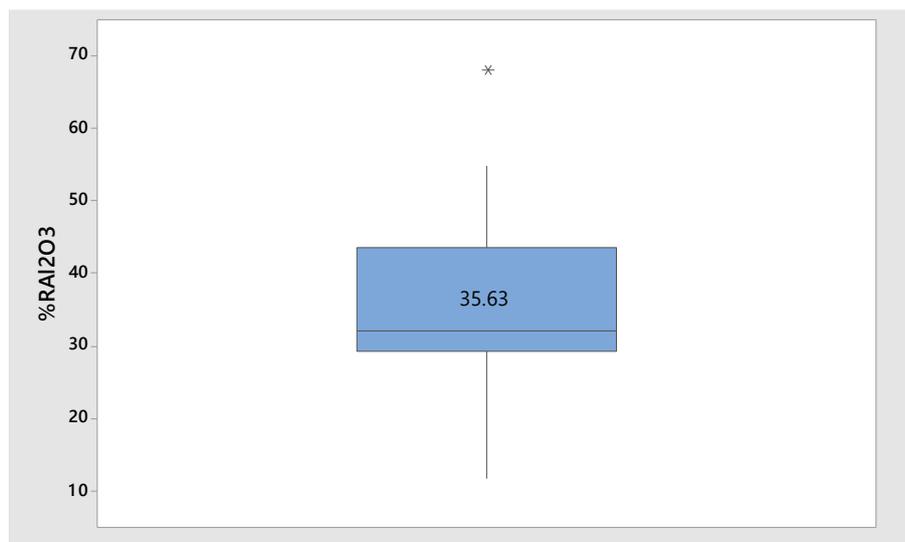


Figura 5.4: Recuperação de alumina na lama

A recuperação mássica na deslamagem é um parâmetro importante porque resulta na perda mássica de material para o *overflow*, que é considerado rejeito. Já a recuperação metalúrgica informa quanto de ferro é perdido nessa operação. Segundo Mapa (2006) na deslamagem podem ocorrer perdas superiores a 20% do conteúdo metálico dos minérios, na maioria das vezes por estar junto às frações finas removidas.

É esperado que minérios com elevado grau de liberação apresentem maior facilidade para obtenção da qualidade nos produtos da flotação, que se traduz em baixo teor de  $\text{SiO}_2$  no concentrado e teor de Fe no rejeito. Nesse aspecto, a recuperação metálica também pode vir a ser afetada com a perda de ferro no rejeito para minérios com baixo grau de liberação (Rodrigues e Brandão, 2017). As recuperações podem ser avaliadas na figura 5.5.

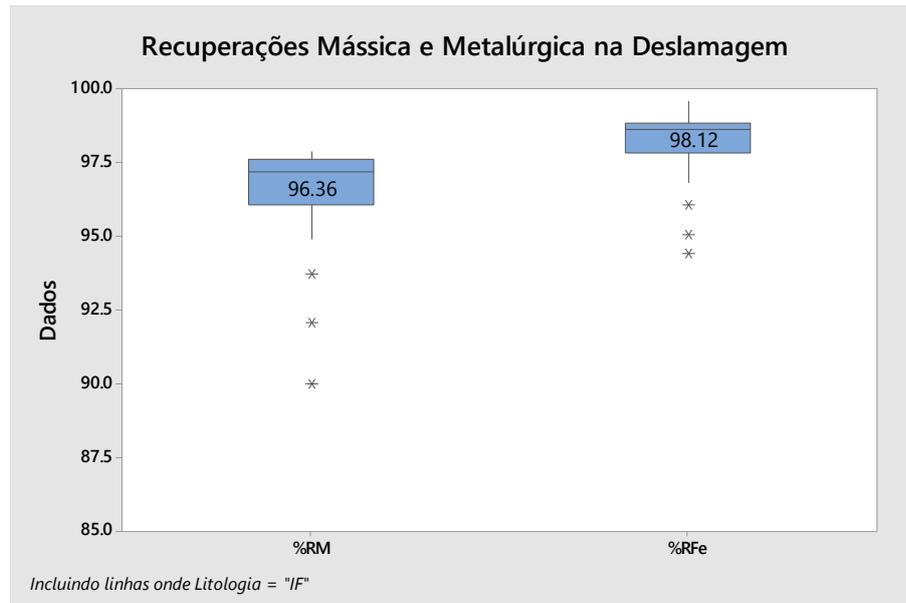


Figura 5.5: Parâmetro de desempenho da Deslamagem

Na Figura 5.6 estão apresentadas as distribuições dos resultados das análises químicas do concentrado, teor de ferro do rejeito e valores de recuperação mássica e metálica no processo de flotação em bancada, apenas para os ensaios realizados com amostras de minérios friáveis (IF).

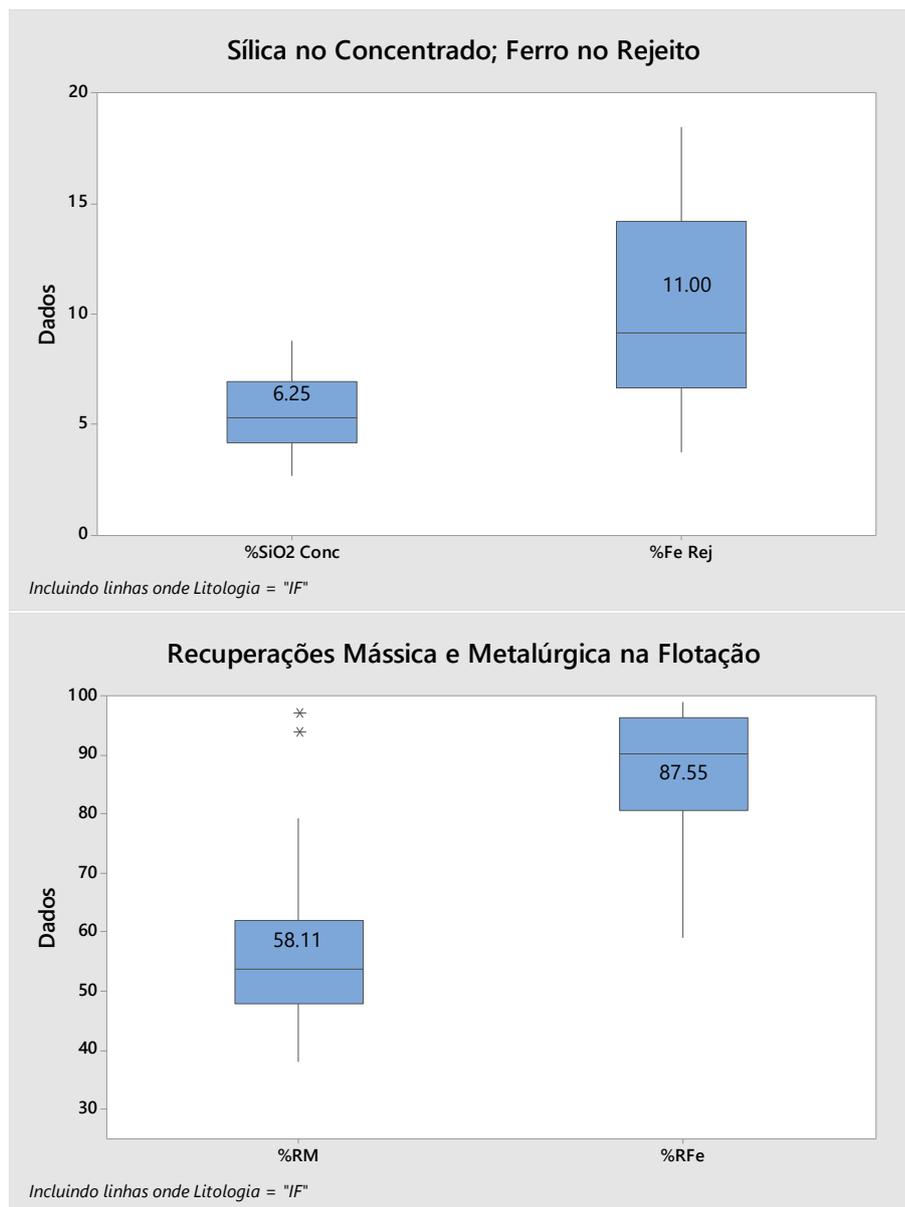


Figura 5.6: Resultados do ensaio de flotação em bancada para IF.

Rodrigues *et al.* (2014) destacam que a partir da representação das variáveis estimadas em cava, tanto no sequenciamento de lavra da reserva ou nos planos de lavra de curto prazo, o valor das variáveis geometalúrgicas estimadas podem ser reportados oferecendo uma resposta direta do desempenho do minério na usina graças ao melhor entendimento sobre o minério da mina.

Ainda que trabalhando com um banco de dados pouco robusto, foram elaboradas representações das variáveis geometalúrgicas em cava para visualizar especialmente a distribuição dos resultados.

Ainda, por meio da classificação sugerida por Lishchuk *et al.* (2015), o presente trabalho se enquadra no nível 2 em que a visualização da variação dos parâmetros dentro do corpo é possível. As figuras abaixo, elaboradas pela equipe da Gerência de Planejamento a Curto Prazo, permitem vislumbrar espacialmente as áreas da cava com diferentes comportamentos geometalúrgicos.

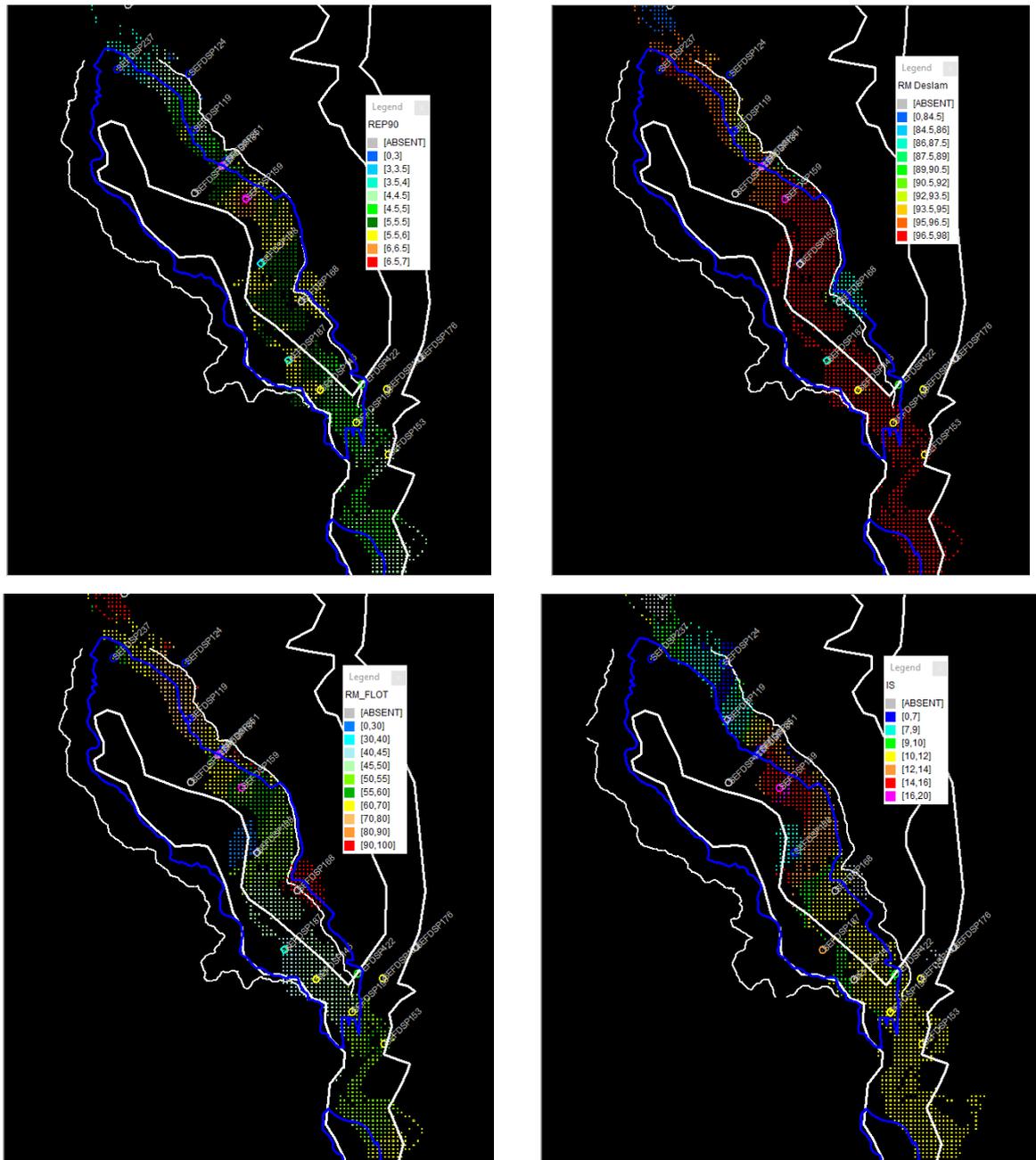


Figura 5.7: Visualização em cava do requerimento energético estimado, da recuperação mássica na deslamagem estimada, da recuperação mássica na flotação estimada e do índice de seletividade na flotação estimado.

Após validação visual das seções onde passam os furos comparando os resultados estimados nos blocos com os valores das amostras, foi possível observar como cada variável geometalúrgica pode variar em cada região.

Regiões onde o Requerimento Energético foi maior evidenciam possíveis dificuldades na etapa de moagem. Além disso, áreas com maiores e menos índices de seletividade pode ser associada às áreas com diferentes recuperações mássicas. Concomitantemente, a distribuição espacial da recuperação mássica na Deslamagem permite avaliar possíveis perdas mássicas nessa etapa.

## 6 CONCLUSÃO

No Programa Geometalúrgico da *Anglo American* foram adotadas metodologias de ensaios relativamente simples. Não se objetivou nesse estudo determinar um modelo para predição de uma variável alvo, sendo, possivelmente, o próximo passo do programa geometalúrgico.

Visto que o contexto geológico da Mina do Sapo compreende minérios de baixo teor de ferro e consideráveis teores de contaminantes, é essencial robustecer o banco de dados do programa geometalúrgico da *Anglo American* para que análises mais precisas e modelos mais realistas sejam criados.

O atual nível de conhecimento geometalúrgico do minério da cava de 2019 já permitiu observar a partir das representações gráficas algumas tendências, principalmente avaliar diferenças entre as litologias e entre amostras de uma mesma litologia. Além disso, foi possível visualizar na cava de 2019 áreas com diferentes comportamentos geometalúrgicos.

A implantação de um programa geometalúrgico é uma ferramenta valiosa que influencia positivamente a tomada de decisões. Na *Anglo American*, a colaboração de cada um dos envolvidos foi ampla e efetiva, desde a seleção de amostras até a avaliação dos resultados. A natureza interativa e multidisciplinar desse estudo possibilitou troca de experiências e conhecimentos entre todos os envolvidos e, por meio dessas primeiras análises, já é possível avaliar com mais profundidade o comportamento do minério da Mina do Sapo.

## 7 SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTUROS

Muitas são as abordagens geometalúrgicas a serem empregadas num projeto de mineração.

Como sugestão para trabalhos futuros:

- Avaliar a influência da mineralogia nas variáveis resposta (*output*);
- Gerar modelos matemáticos de predição a partir das variáveis de processo (*inputs*) de maior influência sobre as variáveis respostas (*output*);
- Realizar amostragens em escala industrial para calibrar os modelos matemáticos de predição.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGLOAMERICAN. Relatório técnico: Relação entre as litologias de minério da Serra do Sapo – Região da Cava de 2016 - Mina do Sapo – Conceição do Mato Dentro (MG). p.17. 2016

DEUTSCH, J. L. et al. Spatial Modeling of Geometallurgical Properties: Techniques and a Case Study. *Natural Resources Research*, v. 25, n. 2, p. 161-181, 2016/06/01 2016. ISSN 1573-8981. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s11053-015-9276-x> >.

DONDA, J. D. A lei de moagem comprovação para minério de ferro. 1 ed. Ouro Preto: Ouro Preto Legraphar, 2014.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro: Texto Didático 6 2002.

LISHCHUK, V. Geometallurgical programs – critical evaluation of applied methods and techniques. 2016. 104 Licentiate thesis, comprehensive summary Licentiate thesis / Luleå University of Technology, Luleå tekniska universitet, Luleå.

LISHCHUK, V. et al. THE GEOMETALLURGICAL FRAMEWORK. MALMBERGET AND MIKHEEVSKOYE CASE STUDIES. *Mining Science*, v. 22, n. 2, p. 57-66, 2015 2015. ISSN 2300-9586. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.5277/ms150206> >.

MAPA, P. S. Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração S.A. 2006. (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas,

PARIAN, M. et al. Analysis of mineral grades for geometallurgy: Combined element-to-mineral conversion and quantitative X-ray diffraction. *Minerals Engineering*, v. 82, p. 25-35, 2015/10/15/ 2015. ISSN 0892-6875. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687515001934> >.

PÉREZ-BARNUEVO, L.; LÉVESQUE, S.; BAZIN, C. Automated recognition of drill core textures: A geometallurgical tool for mineral processing prediction. *Minerals Engineering*, v. 118, p. 87-96, 2018/03/15/ 2018. ISSN 0892-6875. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687517303229> >.

ROBERTO, J. B. Influência dos diversos tipos litológicos nas operações de concentração da instalação de beneficiamento de Brucutu. 2010. 104 (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG

RODRIGUES, R. D. S. et al. Desenvolvimento de um modelo matemático para determinação do requerimento de energia de moagem da reserva de minério de ferro da Samarco Mineração S.A. *44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro*, v. 44, p. 5093-5105, 2014. ISSN 2594-357X. Disponível em: < <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/desenvolvimento-de-um->

[modelo-matematico-para-determinacao-do-requerimento-de-energia-de-moagem-da-reserva-de-minerio-de-ferro-da-samarco-mineracao-sa](#) >.

RODRIGUES, R. D. S.; BRANDÃO, P. R. G. Influência da liberação mineral nas etapas de moagem e flotação do minério de ferro. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, v. v. 14, n. 3, p. 279-287, jul./set. 2017, 2017. Disponível em: < <http://tecnologiammm.com.br/doi/10.4322/2176-1523.1153> >.

ROSA, A. C. Desempenho dos circuitos de moagem direto e inverso da Samarco. DELBONI JÚNIOR, H. São Paulo: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP; Universidade de São Paulo; Escola Politécnica 2012.

SOLA, C.; HARBORT, G. Geometallurgy – Tricks, traps and treasures. 11th Australasian Institute of Mining and Metallurgy., p. 16, 2012. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/289424492\\_Geometallurgy\\_-\\_Tricks\\_Traps\\_and\\_Treasures](https://www.researchgate.net/publication/289424492_Geometallurgy_-_Tricks_Traps_and_Treasures) >.

ULIANA, A. Deslamagem de minério de ferro itabirítico: geometalurgia e regressão estatística. 19 Simpósio de Mineração, 2018. São Paulo: ABM Week. 4: 10 p. 2018.