



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

BRUNO ALVES FONTENELE

A GEOMETALURGIA E A ATUAÇÃO DO ENGENHEIRO METALURGISTA
NO TRATAMENTO DE MINÉRIOS

FORTALEZA

2021

BRUNO ALVES FONTENELE

A GEOMETALURGIA E A ATUAÇÃO DO ENGENHEIRO METALURGISTA
NO TRATAMENTO DE MINÉRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora de graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do Título de Bacharelado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.

FORTALEZA

2021

BRUNO ALVES FONTENELE

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F763g Fontenele, Bruno Alves.
A Geometalurgia e a Atuação do Engenheiro Metalurgista no Tratamento de Minérios / Bruno Alves Fontenele. – 2021.
34 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.
1. Geometalurgia. 2. Processamento Mineral. 3. Modelo Geometalúrgico. 4. Programa Geometalúrgico. I. Título.

CDD 669

BRUNO ALVES FONTENELE

A GEOMETALURGIA E A ATUAÇÃO DO ENGENHEIRO METALURGISTA
NO TRATAMENTO DE MINÉRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora de graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do Título de Bacharelado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Enio Pontes de Deus
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Genilda e Taumaturgo, e ao
meu irmão João Gabriel.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por sempre me dar forças e me manter de pé diante dos meus desafios.

A minha mãe Genilda e ao meu pai Taumaturgo, por sempre apoiarem e acreditarem nos meus sonhos e pelos seus exemplos de dedicação e compreensão.

Ao meu irmão, João Gabriel, por todo o seu companheirismo e fidelidade a mim disponibilizado.

Ao Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira, por todo o carinho, dedicação, atenção e entusiasmo, bem como os professores participantes da banca examinadora, Prof. Dr. Enio Pontes de Deus e Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva pela disponibilidade e pelas importantes colaborações dispensadas.

Ao Secretário do Curso de Engenharia Metalúrgica, Antonio Bandeira, pelo apoio, paciência e atenção ofertados durante o curso.

Ao Dr. Marcelo Antônio Santos da Silva, por sua amizade e parceria ofertada ao decorrer da graduação.

Aos meus amigos da graduação, que tornaram a trajetória mais leve, e pelos momentos vividos durante o curso.

Por fim, agradeço à minha companheira Keiliane Vasconcelos por todo o cuidado, carinho, compreensão e atenção.

“Deus é grande, Deus é forte, quando Ele quer,
não há quem não queira.” – Ayrton Senna.

RESUMO

Geometalurgia é a correlação interdisciplinar de diversas áreas (geologia, geotecnia, engenharia de minas, metalurgia, economia mineral, e parâmetros geoambientais) que combinadas aos projetos de mineração permitem uma maior previsibilidade da planta, reduzindo os riscos, aumentando os lucros e otimizando o aproveitamento de recursos minerais de uma jazida. A notoriedade desta ferramenta é presente nas tomadas de decisões, planejamentos, e sustentabilidade do processo no estudo dos seguintes fatores: queda nos teores do minério (decorrente da exploração mineral), questões ambientais (impacto ao ambiente, aumento e acúmulo da complexidade do depósito, limitações no fornecimento de água), crescimento da demanda mundial por estes produtos, e custos e disponibilidade de energia. O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica do tema, visando conceituar e demonstrar a importância de integralizar esta ferramenta aos projetos de mineração, correlacionando com a necessidade de implementar os conceitos e noções da Geometalurgia nas disciplinas de beneficiamento ou tratamento de minérios ministradas nos cursos de Engenharia Metalúrgica no Brasil.

Palavras-chave: Geometalurgia. Processamento Mineral. Modelo Geometalúrgico. Programa Geometalúrgico.

ABSTRACT

Geometallurgy is the interdisciplinary correlation of several areas (geology, geotechnics, mining engineering, metallurgy, mineral economics, and geoenvironmental parameters) that combined with mining projects demonstrate greater plant predictability, reducing risks, increasing profits and optimizing utilization mineral resources from a deposit. The notoriety of this tool is present in the decision making, planning, and sustainability of the process in the study of the following factors: drop in ore contents (due to mineral exploration), environmental issues (impact on the environment, increase and accumulation of the complexity of the deposit, limitations in water supply), growth in world demand for these products, and energy costs and availability. This work presents a literature review of the subject aiming to conceptualize and importance of integrating this tool to mining projects as well as the need to introduce its concepts and notions in the syllabuses of the Metallurgical Engineering courses in Brazil.

Keywords: Geometallurgy. Mineral Processing. Geometallurgical Model. Geometallurgical Program.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma típico de tratamento de minério	16
Figura 2 – Modelo de Blocos	18
Figura 3 – Etapas do Modelo Geometalúrgico	19
Figura 4 – Estrutura de um Programa Geometalúrgico	20
Figura 5 – Etapas de um Programa Geometalúrgico	21
Figura 6 – Comparação da abordagem geometalúrgica atualmente usada (acima) e a abordagem baseada em partículas proposta (abaixo)	24
Figura 7 – Recuperação de partículas binárias de galena-esfalerita e galena-quartzo	27
Figura 8 – Estrutura do Simulador baseado em propriedades para Processamento de Minerais ..	29
Figura 9 – Exemplo de plataforma de simulação	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	<i>Objetivo Geral</i>	14
1.2	<i>Objetivo Específico</i>	14
1.3	<i>Metodologia</i>	14
2	CONCEITO DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS	15
3	GEOMETALURGIA	17
3.1	<i>Conceitos</i>	17
3.2	<i>A Importância da Geometalurgia</i>	24
3.3	<i>Modelo Geológico</i>	25
3.4	<i>Modelo de Quebra de Partículas</i>	26
3.5	<i>Modelo de Processamento Unitário</i>	27
4	COMBINANDO OS MODELOS EM UMA SIMULAÇÃO	30
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
6	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

O objetivo da atividade mineira é a descoberta, a lavra e a concentração de minérios, ou seja, as atividades executadas dentro da mineração consistem em: descobrir os recursos minerais escondidos no subsolo, trazer o bem mineral do subsolo até a superfície para, finalmente, colocar esse bem mineral em condições de ser utilizado pelas indústrias metalúrgica, cerâmica ou química (Chaves, 2006).

Os recursos minerais presentes num depósito serão considerados ou caracterizados como economicamente viáveis desde que cumpram os condicionantes internos como qualidade, quantidade, mercado e logística. Além disso, também deverão ser considerados fatores externos como políticos, sociais, e outros que não dependam do depósito mineral, mas eles afetam diretamente no processo (Ferreira 2001, Quaresma 2002, Gonçalves 2010).

Atualmente, os projetos e/ou empreendimentos minerais vêm mudando radicalmente seus paradigmas. Longe estão os dias em que a geologia, mineração e metalurgia, áreas distintas do conhecimento, porém próximas, atuavam sem um idioma comum e de maneira não interligada. Anteriormente, a teoria e a prática obedeciam à sequência: “primeiro, o Geólogo; depois, o Engenheiro de Minas e por final o Engenheiro Metalúrgico”, entretanto, esta afirmativa não é mais válida. A mineração evoluiu e, hoje em dia, essa lógica de trabalho mudou, observando-se que ela é integrada, e cada parte componente tem participação na tomada de decisões, tornando-se assim numa atividade com enfoque multidisciplinar, que requer uma preparação e visão técnico-econômica bem definida. Atuando dessa forma, será possível enfrentar os novos desafios impostos aos profissionais que exercem essa atividade (Takehara 2004, Dunham & Vann 2007, Turner-Saad 2010).

Geometalurgia é uma atividade interdisciplinar que integra geologia, geotecnia, engenharia de minas, metalurgia, economia mineral, e parâmetros geoambientais para maximizar o valor econômico de um projeto, reduzir riscos, construir resiliência e demonstrar boa gestão dos recursos. (DOMINY, et al., 2018).

Atualmente, o termo “geometalurgia” deixou de referir-se apenas à caracterização mineralógica do mineral de interesse e de ganga e passou a ter um conceito mais amplo. A geometalurgia moderna abrange um conceito de sustentabilidade geometalúrgica que consiste na interpretação, análise, avaliação e validação de todos os aspectos técnicos que suportam os

resultados de cada uma das atividades associadas ao projeto, de acordo com o avanço na obtenção de dados técnicos e econômicos, para converter recursos minerais em reservas de minério. Assim sendo, a caracterização mineralógica e metalúrgica é aplicada em projetos conceituais, de préviabilidade dos recursos e em projetos finais de viabilidade econômica, maximizando seus valores (Dobby et al., 2004, apud Motta, 2014; Baumgartner, 2011).

A utilização dos parâmetros geometalúrgicos na modelagem do depósito, tais como variação da dureza, mineralogia, grau de liberação e porosidade, possibilita a identificação prévia da variabilidade do comportamento metalúrgico de diferentes tipologias e, ainda, dá apoio à estabilidade dos processos. Essa caracterização tecnológica, que não passa de uma visão restrita da geometalurgia, identifica os diferentes desempenhos do minério no beneficiamento de minério (Lemos, 2013).

Segundo Dunham & Vann (2007), essa abordagem multidisciplinar engloba o conceito de modelagem geometalúrgica, cuja incorporação na mineração tem como objetivo minimizar as incertezas associadas na determinação econômica do recurso; conseqüentemente, classificando-o como econômico ou não para seu aproveitamento. Ao integrar informações de geologia, planejamento de mina, desenho operacional e de recuperação metalúrgica, é possível melhorar a compreensão e o conhecimento do depósito mineral obtendo-se assim, um melhor aproveitamento dos recursos e das reservas minerais (Turner-Saad 2010).

O minério de ferro é uma das matérias-primas de uso mais antigo e, desde a sua descoberta, durante o Período Neolítico, tem ampliado o seu leque de aplicações. Atualmente, é um produto essencial para a indústria moderna, visto que a indústria do aço continua a ser a espinha dorsal do desenvolvimento industrial de um país.

O Brasil possui 6,4% (21 bilhões de toneladas) das reservas mundiais e está em 5º lugar entre os países detentores de maiores quantidades de minério. Os altos teores de ferro em seus minérios (60% a 67% nas hematitas e 50% a 60% nos itabiritos e jaspilitos, em termos de ferro contido) levam o Brasil a ocupar um lugar de destaque no cenário mundial.

A produção mundial de minério de ferro tem ao longo das últimas décadas crescido sensivelmente, quando já em 2002 a produção era de 1,1 bilhões de toneladas/ano; enquanto em 2008 a produção anual atingiu mais de 2 bilhões de toneladas. Destaca-se que a participação da produção brasileira representou em torno de 20% da produção mundial. No Brasil, o minério de ferro é o metal explorado mais importante, tanto por sua reserva quanto por sua importância econômica na balança comercial. Nas últimas décadas, o Brasil se tornou um dos maiores produtores de ferro do mundo (Minério de Ferro – Geologia e

Geometalurgia).

Em virtude da importância do minério de ferro no Brasil, faz-se necessário o estudo sobre os seguintes assuntos: (i) tipos de depósitos de minério de ferro; (ii) exemplos de depósitos de minério de ferro de classe mundial; (iii) caracterização dos minerais de ferro; (iv) caracterização e comportamento geometalúrgico dos minérios de ferro brasileiro. Neste contexto, fica evidente a importância do estudo para os geólogos, engenheiros metalúrgicos e de minas, bem como para tecnólogos que trabalham com minério de ferro nos seus diversos processos, ou seja, exploração, lavra e siderurgia.

O minério de ferro, definido como um material de vários tipos e qualidades é lavrado e processado em função dos parâmetros do mercado. Alguns fatores a serem considerados para a extração do minério de ferro são (Gross 1993):

- Tamanho e localização dos depósitos e facilidades de transporte;
- Tipo, composição química e propriedades físicas do minério adequado ao mercado;
- Comportamento do minério na concentração e beneficiamento;
- Qualidade e composição de outras matérias-primas como calcário, coque e carvão;
- O tipo de fusão e o processo siderúrgico utilizado.

O minério de ferro, além de apresentar alto teor de Fe, deve apresentar também especificações químicas e físicas, tais que possa ser facilmente concentrado. Deve conter baixos teores de Si, Al, Mg, P e Ca apesar dos teores máximos destes elementos variarem para cada usina siderúrgica. A quantidade total dos elementos menores e impurezas não deve exceder o limite de tolerância do processo de redução metalúrgico em uso, pois as escórias retidas dentro do alto-forno tornam o processo ineficiente. Na atualidade, a indústria mineral realiza a modelagem tridimensional do depósito, pois ela auxilia principalmente na visualização, interpretação e planejamento das atividades de lavra, além disso, existem outras aplicações no dia a dia tais como (Takehara 2004):

- Dimensionamento de taludes (altura e inclinação) em função das direções de avanço das frentes de lavra e de suas relações com as principais estruturas presentes na jazida, por exemplo, foliações, contatos, zonas de cisalhamento e fraturas;
- A otimização das operações de fragmentação; corte e extração, considerando a distribuição das lentes e faixas de minérios compactos,

friáveis e pulverulentos (caso da mina Alegria e outras de ferro com minérios similares);

- A programação preliminar da mistura dos minérios provenientes das diversas frentes de lavra (run of mine);
- A cubagem e estimativa de reservas, em associação a outros programas de mineração que permitam cálculos de área, volume e variabilidade do depósito.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo apresentar os principais conceitos da Geometalurgia e demonstrar a importância da Geometalurgia para a atuação profissional do engenheiro metalúrgico, tanto na atualidade como no futuro, principalmente no âmbito das operações de tratamento/beneficiamento de minérios.

1.2 Objetivo Específico

Descrever os principais modelos de aplicação da Geometalurgia (Modelo Geológico, Modelo de Quebra de Partículas e Modelo de Processamento Unitário) bem como a combinação desses modelos em simulação.

1.3 Metodologia

A maior parte das fontes deste trabalho consiste de teses e dissertações, que abordam conceitos oriundos de fontes primárias e permitem um maior embasamento e uma análise mais profunda do assunto. Isto é justificado, porque a Geometalurgia é dita como uma abordagem de caráter multidisciplinar envolvendo áreas da Geologia, Mineração, Metalurgia e Ciências Econômicas.

2 CONCEITO DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS

Tratamento de Minérios é o conjunto de operações (aplicadas aos bens minerais) que visam modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem modificar a identidade química ou física dos minerais. Alguns autores defendem um conceito mais amplo para o tratamento de minérios, como sendo um processamento no qual os minerais podem sofrer alterações de ordem química, resultantes de simples decomposição térmica ou mesmo de reações típicas geradas pela presença do calor.

“As operações de concentração – separação seletiva de minerais – baseiam-se nas diferenças de propriedades entre o mineral-minério (o mineral de interesse) e os minerais de ganga. Entre estas propriedades se destacam: massa específica (ou densidade), suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades de química de superfície, cor, radioatividade, forma etc. Em muitos casos, também se requer a separação seletiva entre dois ou mais minerais de interesse.

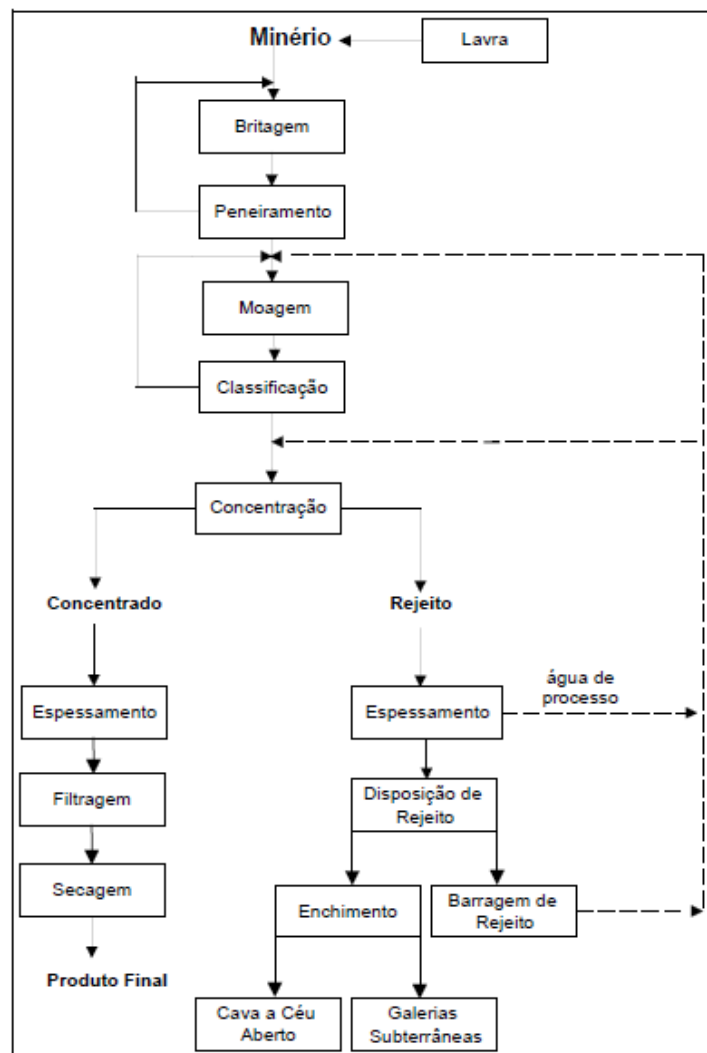
Para um minério ser concentrado, é necessário que os minerais estejam fisicamente liberados. Isto implica que uma partícula deve apresentar, idealmente, uma única espécie mineralógica. Para se obter a liberação do mineral, o minério é submetido a uma operação de redução de tamanho – cominuição, isto é, britagem e/ou moagem –, que pode variar de centímetros até micrometros. Como as operações de redução de tamanho são caras (consumo de energia, meio moedor, revestimento etc.), deve-se fragmentar só o estritamente necessário para a operação seguinte. Para evitar uma cominuição excessiva, faz-se uso de operações de separação por tamanho ou classificação (peneiramento, ciclonagem etc.), nos circuitos de cominuição. Uma vez que o minério foi submetido à redução de tamanho, promovendo a liberação adequada dos seus minerais, estes podem ser submetidos à operação de separação das espécies minerais, obtendo-se, nos procedimentos mais simples, um concentrado e um rejeito.

Na maioria das vezes, as operações de concentração são realizadas a úmido. Antes de se ter um produto para ser transportado, ou mesmo adequado para a indústria química ou para a obtenção do metal por métodos hidro-pirometalúrgicos (áreas da Metalurgia Extrativa), é necessário eliminar parte da água do concentrado. Estas operações compreendem desagumamento (espessamento e filtragem) e secagem.” (Tratamento de Minérios, Centro de Tecnologia Mineral – 2010).

A Figura 1 ilustra um fluxograma característico de tratamento de minérios, com recirculação de água. O minério bruto originado da etapa de lavra de uma mina passa por diversas operações unitárias, que são assim classificadas:

- (i) cominuição: britagem e moagem;
- (ii) peneiramento (separação por tamanhos) e classificação (ciclonação, classificação em espiral);
- (iii) concentração: gravítica, magnética, eletrostática, flotação etc.
- (iv) desaguamento: espessamento e filtração;
- (v) secagem: secador rotativo, spray dryer, secador de leito fluidizado;
- (vi) disposição de rejeito.

Figura 1 – Fluxograma típico de tratamento de minério



Fonte: Tratamento de Minérios. Autor: Centro de Tecnologia Mineral, 2010.

3 GEOMETALURGIA

3.1 Conceitos

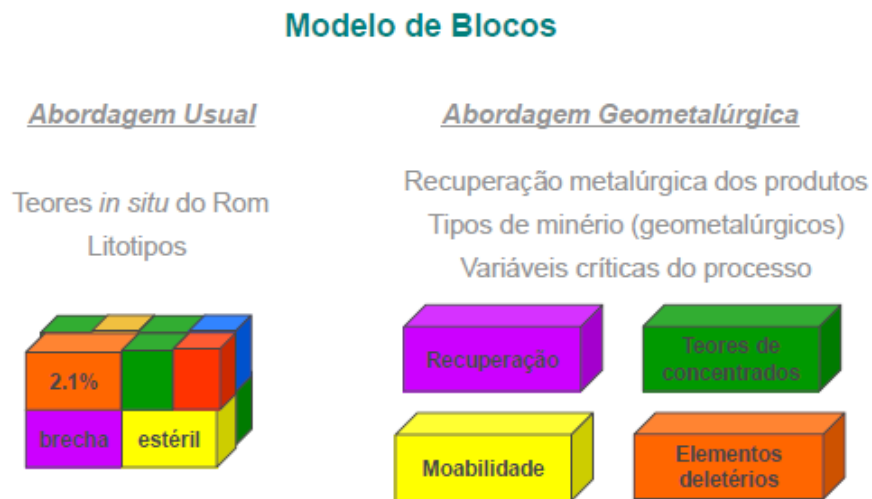
Para se discutir o tema em questão deste trabalho, é necessário definir o termo Geometalurgia: abordagem multidisciplinar que integra o conhecimento geológico do depósito com as áreas de processamento mineral e mina, visando reduzir o risco do negócio e otimização dos ativos, com maior previsibilidade dos processos. (Grupo Vale, 2006).

Esta abordagem geometalúrgica existe para permitir a interação e romper as barreiras entre os profissionais das áreas de Negócio, Mina, Processo e Geologia, beneficiando estes profissionais com uma melhor integração.

A geometalurgia cresce com o desenvolvimento da tecnologia, ela absorve as informações das áreas de caracterização mineralógica, britagem, moagem, flotação, entre outros. Assim, obtém-se um maior detalhamento e complexidade das tipologias minerais presentes em uma jazida, visando definir o melhor planejamento para a extração do elemento de interesse.

Há uma analogia com a “agricultura de precisão”, que é um moderno sistema de gestão agrícola baseado na variabilidade espacial (taxas de insumos diferentes, de acordo com a necessidade específica de cada subárea da lavoura) e temporal da unidade produtiva, visando a um maior retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do impacto ambiental. A geometalurgia pode ser vista como a “mineração de precisão”. Na geometalurgia as diversas disciplinas relacionadas aos projetos de mineração são utilizadas de forma coerente, com as informações de cada etapa produtiva afetando as estratégias e decisões do processo como um todo. Para entender melhor a geometalurgia, é necessário comparar o sistema tradicional com o sistema geometalúrgico. (Schneider, 2014). A figura 2 aborda os diferentes tipos de modelo de blocos geometalúrgicos.

Figura 2 – Modelo de Blocos

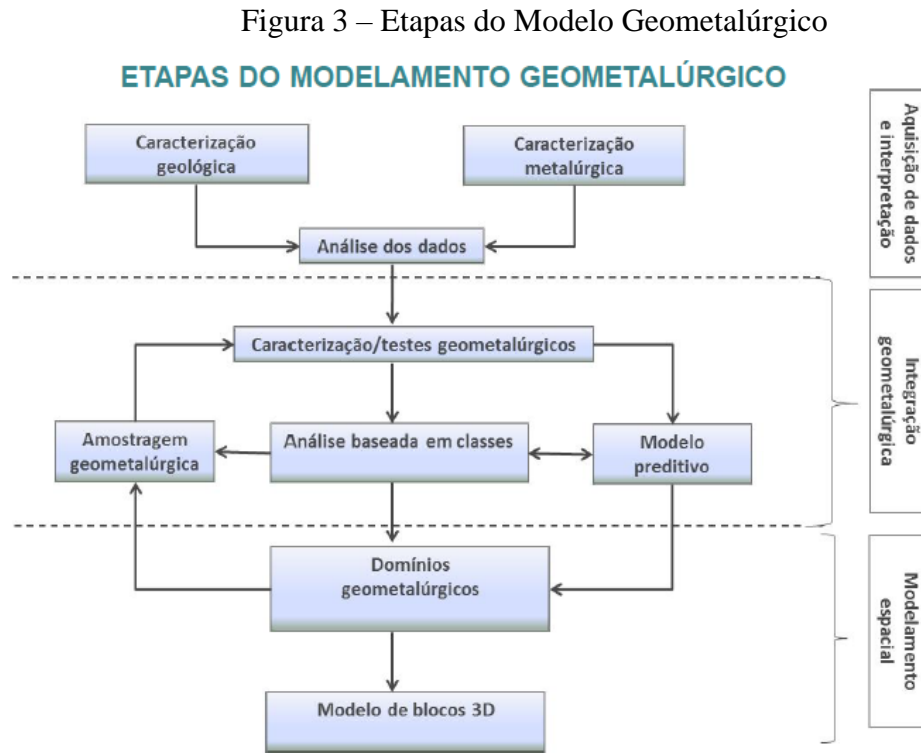


Fonte: Curso Mineração Geometalurgia. Autor: Vale, 2015.

No sistema tradicional as informações produzidas a partir dos furos de sondagem são organizadas em blocos caracterizados por teor e densidade, além das informações espaciais. A geoestatística utiliza estas informações de forma a produzir um modelo de blocos mais acurado da jazida, no qual a confiabilidade do teor, por exemplo, de cada bloco é maior. Assim, a cubagem se tornamais acurada, bem como o planejamento da lavra. A economicidade do projeto, incluindo o fluxo de caixa, resulta apenas do teor corrigido de cada bloco e da sequência de lavra a ser utilizada. Para isso, assume-se uma capacidade constante da planta de processamento, assim como uma determinada recuperação e qualidade do produto. (Schneider, 2014).

No sistema geometalúrgico, outras informações pertinentes sobre o minério são incluídas no modelo de blocos. Para simplificar, vamos considerar somente duas variáveis adicionais, a tenacidade do bloco e a recuperação do mineral/metal de interesse em um processo de concentração. A tenacidade de um bloco pode ser medida a partir de índices de moabilidade, medidos em amostras de furos de sondagem. O índice de moabilidade define a capacidade ou taxa de alimentação que a planta pode atingir para cada bloco, ou seja, blocos mais tenazes são associados à uma capacidade menor de processamento e os mais friáveis, à uma capacidade maior. Esta informação por si só é muito útil na etapa de planejamento de lavra, já que o fluxo de caixa depende da capacidade de processamento de cada bloco. Porém, pode-se ir mais longe. Se, além da informação sobre a tenacidade, houver informações mineralógicas suficientes sobre o bloco, especialmente em relação à presença de minerais deletérios e à liberação dos minerais de interesse, estimativas mais acuradas relativas à recuperação esperada do processo de

concentração são possíveis. Com isso, pode-se prever, com significativamente mais segurança, a capacidade de produção de concentrado relativa a cada bloco. (Schneider, 2014). A figura 3 representa as etapas do modelamento geometalúrgico.



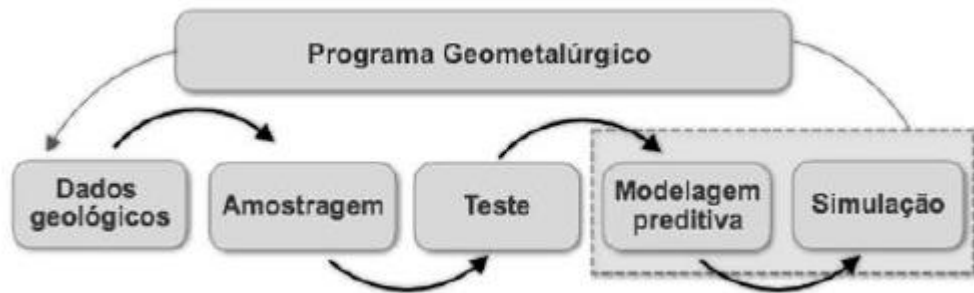
Fonte: Curso Mineração Geometalurgia. Autor: Vale, 2015.

A elaboração das etapas iniciais no desenvolvimento de um projeto com abordagem geometalúrgica possuem a inserção de dados da Geologia (baseados modelos geológicos, geométricos e geomecânicos); Geoestatística (baseados em modelo de blocos de teores); Metalurgia (dados da Caracterização mineralógica, física e química das amostras e parâmetros de processos obtidos dos estudos de variabilidade).

A inserção dos dados dessas três áreas tem como objetivo entender e traduzir para o modelo de blocos as variações geológicas e metalúrgicas do minério visando maior previsibilidade na e mina e usina. Assim, após o entendimento desses dados obtém-se os resultados de Geoestatística, com a definição de domínios geometalúrgicos e parâmetros significativos; e Modelos matemáticos dos parâmetros geometalúrgicos para subsidiar o planejamento de mina e Modelo de blocos com parâmetros geometalúrgicos.

O processo de criação, manutenção e utilização de um modelo geometalúrgico é chamado “Programa Geometalúrgico”, e sua estrutura é apresentada na figura 4 (LISHCHUK, 2016).

Figura 4 – Estrutura de um Programa Geometalúrgico



Fonte: Adaptada de (LISHCHUK, 2016).

Segundo Lamberg, a abordagem baseada em partículas usa minerais e partículas como parâmetros comuns no programa geometalúrgico, desde a coleta dos dados geológicos até as simulações do processo. A abordagem consiste em três modelos quantitativos: 1) modelo geológico, 2) modelo de quebra de partículas e 3) modelos de processos unitários.

O modelo geológico descreve, quantitativa e espacialmente, composição modal e textura do minério. O modelo de quebra de partículas descreve quantitativamente que tipo de partículas serão produzidas à medida que as rochas dadas pelo modelo geológico são quebradas. Os modelos de processo unitário quantificam como as partículas se comportam em diferentes operações unitárias.

O programa geometalúrgico é uma tentativa organizada de criar um modelo confiável, prático e útil de um depósito mineral e de uma planta de processamento de minério usada para explorar o recurso. O programa geometalúrgico segue as seguintes etapas (modificadas após Bulled & McInnes 2005, David 2007 e Dobby et al. 2004, Figura 5):

1) Coleta de dados geológicos por meio de perfuração, perfilagem do núcleo de perfuração, medições, análises químicas e outras análises.

2) Um programa de amostragem de minério para testes metalúrgicos, onde dados geológicos são usados na identificação de locais preferidos para as amostras.

3) Testes de laboratório dessas amostras para extrair parâmetros do modelo de processo (às vezes chamados de teste de variabilidade do minério).

4) Verificar a validade metalúrgica das definições do tipo de minério geológico e, quando necessário, desenvolver novas definições do tipo de minério chamadas domínios geometalúrgicos.

5) Desenvolvimento de relações matemáticas para a estimativa de parâmetros

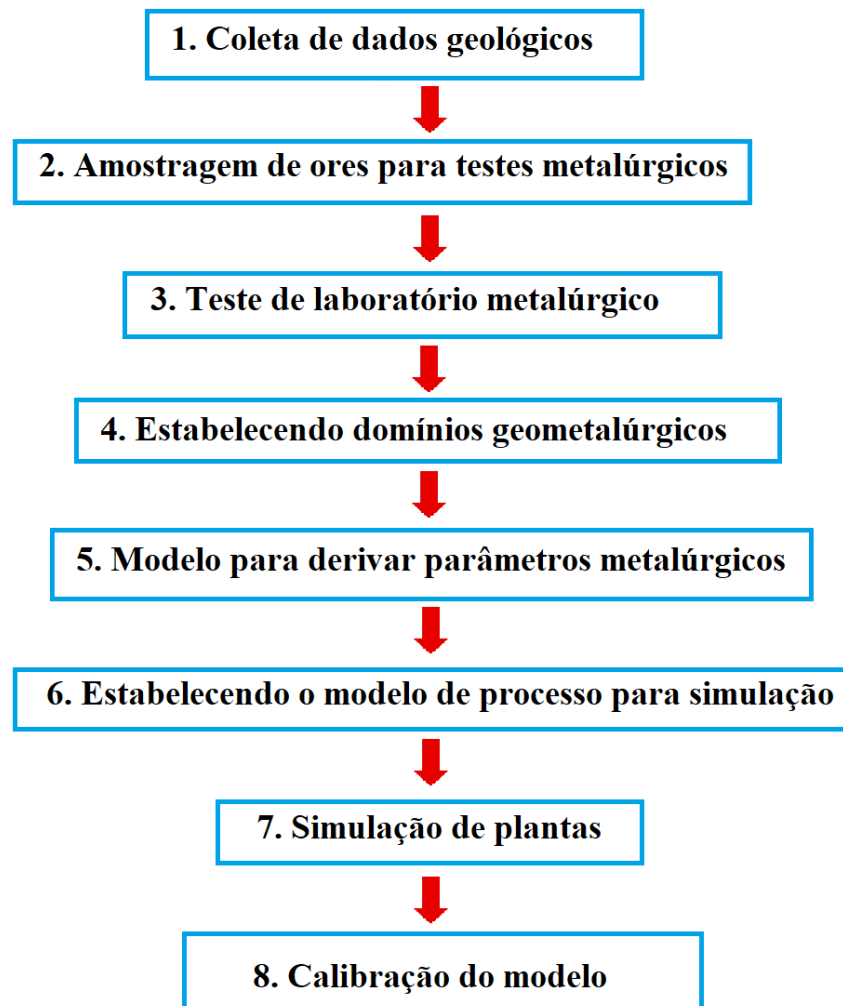
metalúrgicos importantes no banco de dados geológico.

6) Desenvolvimento de um modelo metalúrgico do processo. O modelo consiste em operações unitárias que usam os parâmetros metalúrgicos definidos acima.

7) Simulação de planta usando o modelo de processo metalúrgico e os parâmetros metalúrgicos distribuídos como o conjunto de dados.

8) Calibração dos modelos via benchmarking para operações existentes.

Figura 5: Etapas de um Programa Geometalúrgico



Fonte: Adaptada de (Lamberg, 2010).

Nos programas geometalúrgicos, os pontos mais fracos são normalmente informações inadequadas coletadas dos núcleos da broca e pequeno número de amostras enviadas para testes metalúrgicos.

Nos testes metalúrgicos, amostras muito pequenas, em termos de tamanho e número, devem representar grandes tonelagens do minério. Geralmente, algumas dezenas de

amostras cuidadosamente selecionadas e preparadas são testadas (Schowstra et al. 2010, Morrell, 2009, Philander & Rozendaal, 2008 e 2010), mas há casos em que todo o programa é baseado em menos de dez amostras (David 2007, Suazo et al., 2010). Isso define altos requisitos para a amostragem e preparação da amostra, a fim de evitar que o erro de amostragem seja tão elevado que limite a utilidade dos dados coletados (Gy 1982, Pitard 1989a e b). Existe também um dilema na seleção e preparação de amostras metalúrgicas com base em informações geológicas: as amostras testadas devem representar a variabilidade total do minério em termos de resposta metalúrgica e isso só pode ser conhecido após a realização dos testes.

Para tornar a amostragem (etapa 2) e a definição de domínios geometalúrgicos (etapa 3) mais confiáveis, são necessárias novas técnicas de medição e análise de rochas (para a etapa 1). Isso tem estado em forte desenvolvimento nos últimos anos (Walters 2008). O desafio é que sejam necessárias medições e análises para um número muito grande de amostras, de milhares a centenas de milhares. As técnicas devem ser rápidas, baratas e preferencialmente totalmente automatizadas. A revisão detalhada das técnicas está fora do escopo deste artigo, mas elas podem ser divididas em três grupos: a) técnicas de medição das propriedades das rochas, b) técnicas de mineralogia quantitativa e c) testes geometalúrgicos.

Os métodos que medem a resposta metalúrgica diretamente (c) são chamados de testes geometalúrgicos. Essa é uma área de rápido desenvolvimento, mas atualmente as publicações científicas ainda são relativamente poucas. Laboratórios comerciais de ensaios de minérios relatam a existência dos seguintes testes geometalúrgicos (JKTech 2010): Índice de Cominuição GeM (GeMCi), GeM RBT Lite (Testador de ruptura rotativo GeM, Lite) e EQUOtip (testador de dureza portátil). Nos processos a jusante, Bradshaw (2010) mencionou um teste de flutuação em pequena escala chamado JKMSI (JK Mineral Separability Indicator). Lund et al. (2010) usaram o separador magnético seco em escala de laboratório (Mörtsell) para medir a resposta metalúrgica do minério de ferro à separação magnética.

Os parâmetros metalúrgicos ou geometalúrgicos determinados pelo teste não preveem diretamente o comportamento de um único bloco de minério em um processo completo. Para isso, é necessário construir um modelo de processamento mineral (etapa 6). O modelo inclui o circuito de processamento completo e compostos pelos processos unitários. Os processos unitários incluem parâmetros estáticos relacionados ao processo (como número de unidades e tamanho das unidades) e parâmetros relacionados ao minério que correspondem aos parâmetros geometalúrgicos determinados anteriormente.

O ambiente de simulação deve ser capaz de lidar com redução de tamanho e concentração. Tradicionalmente, simulações de cominuição e simulações de concentração têm

sido realizadas separadamente. A primeira fornece rendimento, consumo de energia e distribuição de tamanho do circuito de cominuição (Morrell, 2009), mas não lida com elementos químicos e minerais. Assim, ela não fornece a distribuição de tamanho do produto do circuito de trituração (por exemplo, transbordamento de ciclones) por mineral. As simulações de concentração, por outro lado, ignoram principalmente a distribuição do tamanho de partícula (por exemplo, Runge et al. 1997).

Uma vez que os modelos são combinados em uma plataforma de simulação, é possível, executando uma simulação em estado estacionário, obter valores de desempenho metalúrgico, como rendimento, consumo de energia, recuperação e classificação de concentrado e propriedades de rejeito para cada bloco de minério ou mistura de alimentação. As simulações podem ser feitas basicamente com qualquer simulador de estado estacionário capaz de lidar com processos de cominuição e concentração.

O principal problema no modelo de processo é que os parâmetros do modelo original devem ser derivados de um número limitado de testes de laboratório e ainda devem fornecer uma previsão confiável para o depósito completo a qualquer momento do histórico da mina (Figura 5). O modelo deve responder a mudanças no processo, por exemplo, no “head grade” (teor do mineral-minério no corpo minerado que vai ser processado) e no rendimento.

A abordagem geometalúrgica baseada em partículas consiste em três modelos (Figura 2):

- 1) Modelo geológico que fornece a mineralogia por bloco de minério.
- 2) Modelo de quebra de partículas que prevê que tipo de partículas serão geradas quando diferentes blocos de minério e rochas quebram.
- 3) Os modelos de processo unitário preveem como as diferentes partículas se comportam em um processo unitário.

3.2 A Importância da Geometalurgia

As fontes de minério relativamente fáceis de processar são cada vez menos recorrentes, e o investimento a longo prazo em estudos geometalúrgicos é vital para superar esse problema. Operações com alto nível de complexidade, serão desenvolvidas e a Geometalurgia será parte inerente de qualquer empreendimento desse porte, inclusive rompendo limites atuais de depósitos que não são explorados devido às rotas de processamentos consideradas impossíveis (alto custo, baixo teor de minério). O futuro da indústria de mineração passa por contribuir de forma impactante para um horizonte sustentável do planeta e é com esse enfoque que algumas das principais pesquisas na área estão sendo desenvolvidas. Novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para exploração de pilhas de estéril e barragem de rejeitos de teor muito baixo, e técnicas para ajudar a reduzir os requisitos de energia e a pegada ambiental das atividades (Bradshaw, 2014; Grasso, 2015).

Segundo Lamberg 2010, a justificativa para o programa geometalúrgico vem do potencial de trazer alguns dos seguintes benefícios em comparação com a abordagem tradicional:

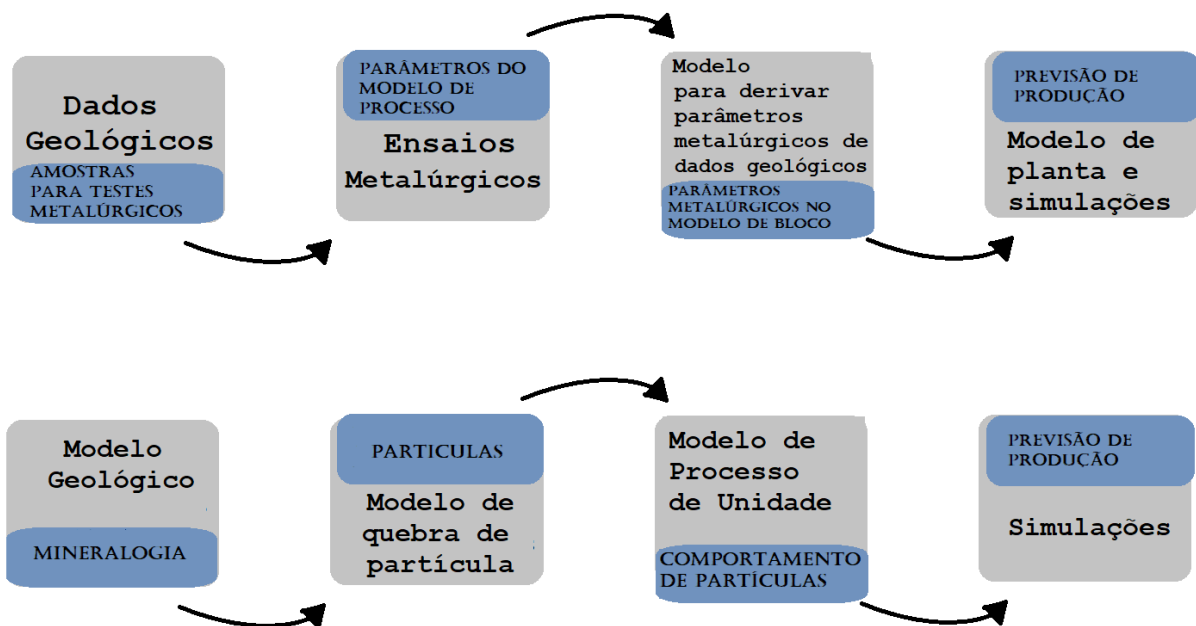
- Melhor utilização dos recursos de minério, porque os limites do minério também são definidos com base no desempenho metalúrgico (previsto).
- Melhor desempenho metalúrgico, porque é possível ajustar o processo de acordo com as informações de alimentação da planta com antecedência.
- Mineração melhor controlada devido ao conhecimento mais abrangente do corpo de minério.
- Maior facilidade de otimização da planta, porque a variação na alimentação da planta é baixa ou, pelo menos, é melhor controlada.
- Maior facilidade para adotar novas soluções tecnológicas porque os problemas derivados do minério são identificados com bastante antecedência e os programas de pesquisa podem se concentrar em resolvê-los.
- Diminuição dos riscos na operação, com um melhor conhecimento do corpo e do processo do minério e através de uma cadeia de processo mais controlada.
- Melhores possibilidades de otimização econômica de toda a operação, considerando preços de metais, produtos alternativos e custos de commodities.

3.3 Modelo Geológico

A abordagem baseada em partículas usa minerais e partículas para ligar geologia e metalurgia. É necessário que o modelo geológico descreva a mineralogia do bloco de minério de maneira quantitativa e adequada. Esse é um requisito desafiador e potencialmente caro, porque muitos dos dados geológicos reunidos tradicionalmente são qualitativos ou semi-quantitativos. O modelo deve fornecer, preferencialmente, composição modal (composição mineral por porcentagem em peso) e informações de textura em todo o depósito de minério (modelo em bloco). A composição modal pode ser resolvida a partir de ensaios químicos com conversão elemento-mineral (Lamberg 1997, Whiten 2008, Lamberg e Vianna 2009). Isso, no entanto, exige que a mineralogia não seja muito complexa e que os ensaios químicos sejam projetados adequadamente. Métodos como difração de raios X e espectroscopia de refletância podem ser usados.

A informação estrutural é muito mais difícil de descrever quantitativamente e modelar do que a composição modal. Além disso, diferentemente das notas minerais, as variáveis texturais não são necessariamente lineares ou aditivas e, portanto, requerem uma consideração geoestatística muito cuidadosa quando aplicadas no modelo de blocos (Dunham & Vann 2007).

Figura 6 - Comparação da abordagem geometalúrgica atualmente usada (acima) e a abordagem baseada em partículas proposta (abaixo)



Fonte: Adaptada de (Lamberg, 2010).

3.4 Modelo de Quebra de partículas

Segundo Lamberg, o modelo de quebra de partículas da abordagem geometalúrgica baseada em partículas é uma regra geral ou coleção de regras que informa quantitativamente que tipo de partículas sairá à medida que as rochas, dadas pelo modelo geológico, forem quebradas. Um modelo de liberação de nome também foi usado, mas aqui, um nome mais genérico foi escolhido para enfatizar que o modelo atual não fornece distribuição de liberação descrita pelas estatísticas, mas partículas reais.

Como entrada, o modelo utiliza a composição modal e as informações texturais do modelo geológico. Além disso, o modelo exige que seja dada a distribuição de tamanho das partículas da progênie; isso vem do modelo da unidade (consulte o capítulo 3.4). O modelo fornece como saída as partículas da progênie. Cada partícula na saída do modelo possui as seguintes propriedades

- tamanho,
- composição mineral em peso,
- composição mineral em volume,
- composição mineral por área de superfície,
- vazão ou proporção de massa de todas as partículas (t / h), e
- (textura como um mapa de partículas, potencialmente).

Vários modelos diferentes foram desenvolvidos no passado para prever a distribuição de liberação de produtos de cominuição. A introdução de mais parâmetros tornou o modelo muito difícil e entediante de calibrar e sua portabilidade se tornou questionável (Wei e Gay 1999; Gay 1999, 2004; King & Schneider 1998).

Dois estudos recentes apresentam uma abordagem mais simples que combina perfeitamente com a estrutura da abordagem geoquímica baseada em partículas aqui descrita. Hunt et al. (2008, 2010) e Bonnici et al. (2008, 2009) simularam a fragmentação de partículas aplicando a segmentação do tabuleiro de xadrez no mapa de partículas de uma fração de um tamanho (0,6-1,18 m.). (Vizcarra et al. 2010), por outro lado, mostraram que a distribuição de liberação é conservada em classes de tamanho estreitas, independentemente da distribuição global de tamanho da amostra ou do mecanismo de ruptura. Esses estudos introduzem uma nova técnica para estabelecer o modelo de quebra de partículas: a partir da textura das rochas dada pelo modelo geológico, é possível preencher partículas com propriedades mineralógicas e físicas para qualquer distribuição de tamanho.

3.5 Modelo de Processamento Unitário

Os modelos de processos unitários descrevem quantitativamente como as diferentes partículas se comportam em um único estágio de processamento. No processamento de minerais, o comportamento das partículas é determinado pelas propriedades das partículas; portanto, os modelos de unidades devem incluir, como parâmetros, as propriedades das partículas, como tamanho, composição e densidade. A estrutura do simulador que liga os modelos de unidades deve ser baseada em partículas (Lamberg 2010).

Os modelos de operações unitárias usados no processamento de minerais podem ser divididos em três tipos:

- Modelos de cominuição em que a distribuição do tamanho de partícula muda.
- Modelos de separação em que as partículas são distribuídas entre dois ou mais fluxos de saída com base em suas propriedades físicas.
- Modelos de lixiviação e precipitação onde a fase líquida é um componente ativo e os minerais se dissolvem e novas fases são formadas através de reações químicas.

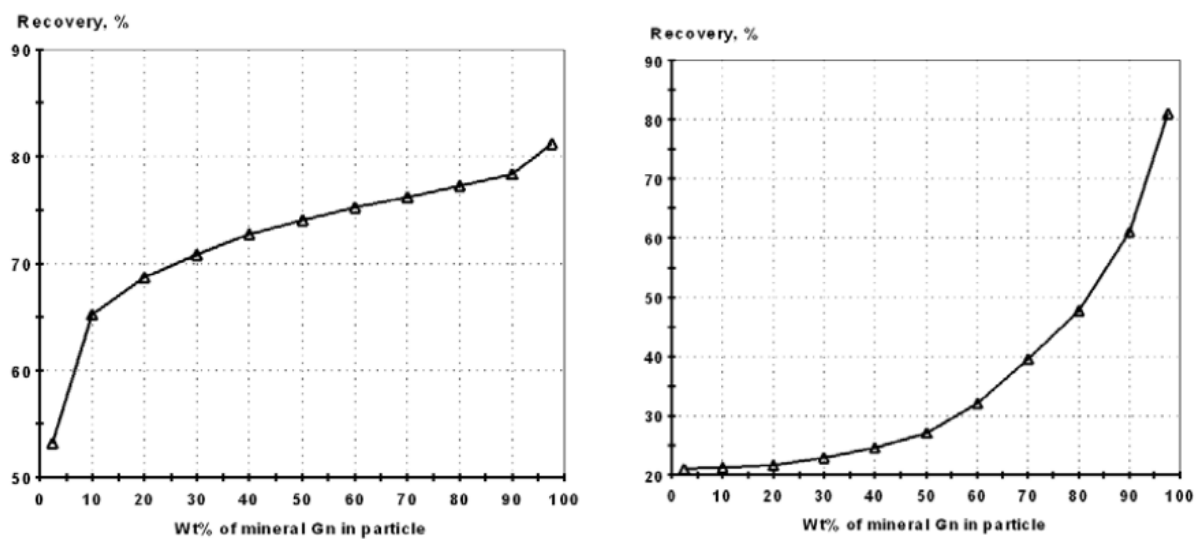
Nos modelos de unidade de cominuição (moinhos, britadores) é possível usar o modelo de quebra de partículas descrito acima. Portanto, no modelo, a previsão da distribuição da liberação e a distribuição total do tamanho podem ser dissociadas. Neste último, os modelos tradicionais de quebra de equilíbrio populacional podem ser usados (Weller et al. 1996; Alruiz et al. 2009, Vogel & Peukert 2003).

A maioria dos modelos de separação e lixiviação utilizados pela indústria são semi-empíricos. No processamento de minerais, o modelo de processo fundamental baseado inteiramente em propriedades físicas, químicas e de partículas ainda está longe de ser prático e preciso o suficiente para o uso diário. Por exemplo, o modelo físico de flotação que descreve subprocessos de colisão, fixação, elevação de bolhas, desapego e comportamento de espuma requer dezenas de parâmetros, os quais são difíceis de determinar ou estimar (King 2001). Portanto, a abordagem comumente usada é o chamado modelo de componente de flotabilidade, onde cada mineral é dividido em três tipos cinéticos: flutuante rápido, flutuante lento e não flutuante (Runge et al. 1997). Embora a divisão em tipos cinéticos seja baseada no ajuste matemático de modelos, Polat e Chander (2000) e, mais recentemente, Welsby et al. (2010), descobriram que existe uma ligação clara entre o tipo de flotabilidade e as propriedades físicas das partículas (ou seja, composição mineral das partículas).

O desenvolvimento de modelos baseados em propriedades de minerais e processamento metalúrgico requer que as propriedades das partículas possam ser medidas em diferentes partes do processo. A análise de libertação é uma técnica de ponta (Sutherland et al. 1997, 1998, Gu, 2003, Fandrich et al. 2007) e a tomografia de raios-X é um método emergente (Miller et al. 2003).

A medição de libertação fornece informações quantitativas sobre partículas no fluxo do processo, mas para fins de modelagem é necessário um balanço de massa de partículas. Lamberg e Vianna (2007) desenvolveram um rastreamento de partículas, que é uma técnica de balanceamento de massa de dados de libertação multifásicos. A técnica fornece uma descrição quantitativa de como os diferentes tipos de partículas (classes de libertação) se comportam em unidades de processo únicas e em todo o processo. Vianna (2004) e Lamberg e Vianna (2007) mostraram que, na flotação, a cinética de flotação das partículas binárias de galena-esfalerita e galena-quartzo difere significativamente uma da outra (Figura 7).

Figura 7 - Recuperação de partículas binárias de galena-esfalerita e galena-quartzo



Fonte: Adaptada de (Vianna 2004, Lamberg & Vianna 2007).

O gráfico representa a fração de tamanho de 10-20 microns no concentrado em teste de flotação laboratorial contínua (Vianna 2004, Lamberg & Vianna 2007). O eixo x fornece a proporção de massa da galena em partículas binárias; onde 100% é igual à partícula de galena totalmente liberada.

A técnica de rastreamento de partículas oferece a oportunidade de desenvolver modelos de unidades baseados nas propriedades das partículas. Esta é uma ferramenta atraente para pesquisa e desenvolvimento, mas é possível aplicar a técnica de maneira prática no

programa geometalúrgico baseado em partículas. O plano de trabalho é o seguinte:

- Em testes metalúrgicos selecionados, amostras são enviadas para análise de liberação.
- A técnica de rastreamento de partículas é aplicada para estabelecer um balanço de partículas em cada teste. As classes de partículas são definidas de maneira uniforme.
- Modelos de unidade baseados em propriedades são criados com base no balanço de partículas.

4 COMBINANDO OS MODELOS EM UMA SIMULAÇÃO

Depois de concluir as etapas de 1 a 6, os modelos podem ser reunidos para todos os modelos e fazer as simulações geometalúrgicas para obter o resultado.

Os números de desempenho metalúrgico como rendimento, consumo de energia, recuperação e classificação de concentrado e propriedades de rejeito para cada bloco de minério ou mistura de ração. Na prática, isso passa pelas seguintes etapas:

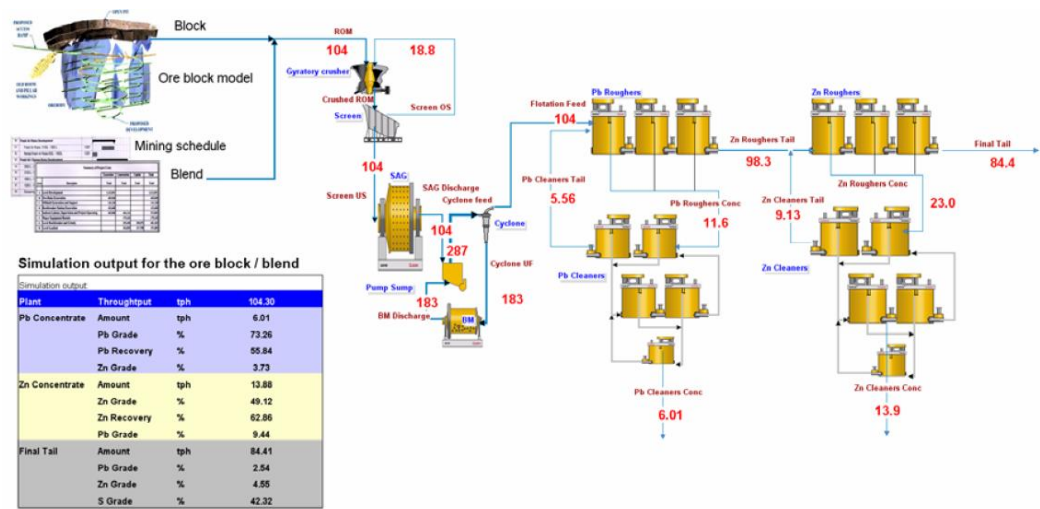
- O simulador de processo é estabelecido para incluir todas as classes de minerais e partículas que foram consideradas significativas no rastreamento de partículas. Isso é chamado de definições globais (Figura 8).
- O fluxograma do processo é desenhado e modelos e parâmetros de modelo baseados em propriedades são definidos (propriedades da unidade Figura 8).

Figura 8 - Estrutura do simulador baseado em propriedades para processamento de minerais

Definições globais
<ul style="list-style-type: none"> • Minerais • Classes de tamanho • Partículas • Outro componente sólido • Componentes líquidos • Componentes de gás
Propriedades básicas
<ul style="list-style-type: none"> • Taxas de fluxo de partículas • Taxas de fluxo de componentes líquidos • Taxas de fluxo do componente de gás
Propriedades Calculadas
<ul style="list-style-type: none"> • Composição mineral (modal), composição química • Densidade (gravidade específica), % de sólidos, • Entalpia
Propriedades da Unidade
<ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros da unidade estática (por exemplo, tamanho) • Parâmetros operacionais

- O modelo geológico e os métodos geoestatísticos são aplicados por todo o banco de dados geológicos para obter as informações mineralógicas necessárias (composição modal, descrição textural) em todos os blocos do modelo de blocos de minério (Figura 9).
- O loop de simulação principal é estabelecido e executado (Figura 9).
- O loop mestre passa um a um pelo modelo de bloco, utiliza um bloco e envia as informações para o simulador de processos.
- O simulador de processo utiliza as informações geológicas e atualiza as informações de caracterização de alimentação (chamadas propriedades básicas do fluxo ou configuração mineral, Figura 8).
- A simulação de estado estacionário é executada.
- Os parâmetros principais, como taxa de transferência, tonelagem final de concentrado, teor e recuperação, são lidos na simulação.
- O loop vai para o próximo bloco.
- Os parâmetros de desempenho do processo são retornados ao modelo de bloco (Figura 9).

Figura 9 - Exemplo de plataforma de simulação



Fonte: Adaptada de (Lamberg, 2010).

Na figura 9, é ilustrada a plataforma de simulação onde o modelo de bloco de minério, cronograma de mineração e calculadora de mistura foram combinados com o modelo baseado em partículas. Cada bloco e mistura são simulados separadamente para fornecer desempenho metalúrgico previsto.

A estrutura permite executar simulações para agendar a produção e estudar diferentes estratégias de mistura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram pesquisados vários sites e bibliotecas digitais, como “ScienceDirect” e o “Periódicos Capes” para a confecção desta monografia.

Durante o processo de revisão da literatura, foram levadas em consideração as opiniões de geólogos e engenheiros metalurgistas, e a evolução do tema e sua relevância cada vez maior para o desenvolvimento da mineração no Brasil.

Pode-se concluir que os objetivos do trabalho foram alcançados, pois foi demonstrada a importância da Geometalurgia no tratamento/beneficiamento/processamento de minérios, bem como a necessidade de conhecimento do tema pelos engenheiros metalurgistas atuantes nessa área. Assim, é muito importante que os conceitos básicos da Geometalurgia sejam abordados no currículo dos cursos de Engenharia Metalúrgica, Geologia e Engenharia de Minas.

6 REFERÊNCIAS

- ARROYO ORTIZ, C. E. **Caracterização geometalúrgica e modelagem geoestatística da Mina de Brucutu – Quadrilátero Ferrífero (MG)**. Ouro Preto: Tese de Doutorado - Universidade Federal de Ouro Preto, v. Contribuição às Ciências da Terra - Vol. 234, 2014.
- BAUMGARTNER, R. et al. **Building a geometallurgical model for early-stage project development – a case study from the Canahuire epithermal Au-cu-Ag deposit, Southern Peru**. In: The First AUSIMM International Geometallurgy Conference; 5-7 September. Brisbane, QLD, Australia, 2011.
- BULLED, D.; MCINNES, C. **Flotation Plant Design and Production Planning through Geometallurgical Modelling**. SGS Mineral Service - Technical Bulletin 2005, v. 3, p. 8, 2005.
- CARMO, L.F.A, LEMOS, M.G, BECHIR, J.L.C, SOUZA, A.D, BHERING, A.P, MARTINS, E.L.C. **Banco de Dados Geometalúrgico da Jazida de Vazante**. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Poços de Caldas: [s.n.]. 2015.
- CRAIG, JAMES; VAUGHAN, DAVID. **Ore Microscopy and Ore Petrography**. 2nd ed. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, INC, 1994.
- CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minério – Flotação, o estado da arte no Brasil**. [S.l.]: Signus, 2006.
- CHEMALE, FARID; TAKEHARA, LUCY. **Minério de Ferro: Geologia e Geometalurgia**. 1ª. ed. São Paulo: Blucher, v. I, 2013.
- Da FONSECA, 2015, **Fundamentos de Geometalurgia: Integração, Geologia, Processo e Mina**, Mini-curso Técnico, VALE, 2015
- Da LUZ, ADÃO BENVINDO; SAMPAIO, JOÃO ALVES; FRANÇA SÍLVIA CRISTINA A.. **Tratamento de Minérios**. 5ª ed. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.
- DOBBY, G., BENNETT, C.; BULLED; D. & KOSICK, G. (2004). **Geometallurgical modeling – the new approach to plant design and production forecasting / planning and mine/mill optimization**. 36Th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors Conference. Ottawa. 227-240.
- DUNHAM, S. & VANN, J. (2007). **Geometallurgy, geostatistics and project value – does your block model tell you what you need to know?** Project Evaluation Conference, Melbourne. 189-196.
- FERREIRA, R. F. **Estudo de Liberação das Fases Mineraias em Minérios de Ferro**. Ouro Preto: Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, v. 211 p., 2013.
- GONÇALVES, Pedro C. Pereira. **Geometalurgia: Panorama da Aplicação no Setor Mínero-Metalúrgico**. 2017. 90 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas). Universidade

Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – MG.

GROSS G. A. 1993. **Industrial and Genetic Models for Iron Ore In Iron Formations**, In: Kirkham K R. V., Sinclair, W. D., Thorpe, F. I. & Duke, J. M. (eds.) - Mineral Deposit Modeling: Geological Association of Canada, Special Paper 40:151-170.

GY, P.M., 1982. **Sampling of Particulate Materials - Theory and Practise**. Developments in Geomathematics 4, Elsevier.

JKTECH, 2010. **JKTech's monthly e-Newsletter**. December 2010.

KING, P. & SCHNEIDER, C.L., 1998. **Mineral liberation and the batch comminution equation**. Minerals Engineering 11, 1143-1160.

KOSICK, GLENN; CHRIS BENNETT; GLENN DOBBY. **Managing Company Risks by incorporating the mine resource model into design and optimization of mineral processing plants**. SGS Technical Paper, Ottawa, n. 21, p. 7 f., 2002.

LAMBERG, P. **Geometallurgy – What, Why and How?** 8th Fennoscandian Exploration and Mining. Levi, Finland: [s.n.]. 2011a.

LAMBERG, P. **Particles – the bridge between geology and metallurgy**. Conference in Minerals Engineering. Lulea: [s.n.]. 2011b. p. 1-16.

LAMBERG, PERTTI; MEHDI PARIAN; ROBERT MÖCKEL; JAN ROSENKRANZ. **Analysis of mineral grades for geometallurgy: Combined element-to-mineral conversion and quantitative X-ray diffraction**. Minerals Engineering, Lulea, 15 Outubro 2015. 25-35

LAMBERG, PERTTI; MINZ, FRIEDERIKE; BOLIN, NILS-JOHAN; WANHAINEN, CHRISTINA. **Detailed characterisation of antimony mineralogy in a geometallurgical context at the Rockliden ore deposit, North-Central Sweden**. Minerals Engineering, Lulea, Outubro 2013c. 95-103.

LEMONS, M. G., BECHIR, J.L.C., SOUZA, A.D., BHERINF, A.P.,...METSAVAHT, V. (2015). **Geometalurgia – integrando mina e beneficiamento para aumento da produtividade – Vazante**, MG. XXVI Encontro Nacional De Tratamento De Minérios e Metalurgia Extrativa, Poços de Caldas. 2, 782-793.

LISHCHUK, V. **Geometallurgical Programs – Critical Evaluation of Applied Methods and Techniques**. Lulea: Luleå University of Technology, v. 64 f., 2016.

MORRELL, S., 2009. **Getting Optimum Value from Ore Characterisation Programs in Design and Geometallurgical Projects Associated with Comminution Circuits**. Tenth Mill Operators' Conference, Adelaide, SA, 12 - 14 October 2009, 167-170.

MOTTA, E. (2014). **Definição de domínios mineralógicos em minério de ferro utilizando krigagem de indicadores. (Dissertação de Mestrado)**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

QUARESMA, L. F. 2002. **Ferro e Aço. Sumário Mineral**. (Eds.) DNPM – Departamento Nacional de Pesquisas Minerais. 22ª Ed. 64-67.

SCHOUWSTRA, R. de VAUX, D., HWY, P., MALYSIAK, V., SHACKLETON, N., & BRAMDEO, S., 2010. **Understanding Gamsberg – A geometallurgical study of a large stratiform zinc deposit.** Minerals Engineering 23 (2010) 960–967.

SCHNEIDER, CLAUDIO, **Geometalurgia, Mineração de Precisão e Sustentabilidade, Revista Mineração e Sustentabilidade**, pp 46-47, Setembro-Outubro, 2014

TAKEHARA, L. **Caracterização Geometalúrgica dos Principais Minérios de Ferro Brasileiros.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, v. 403f., 2004.

TURNER-SAAD, G. 2010, **Vision for a risk adverse integrated Geometallurgy Framework**, In: 42nd Annual Canadian Mineral Processors, Ottawa, Canada, 1 p. 156.

VIANNA, S.M.S.M. 2004. **The effect of particle size, collector coverage and liberation on the floatability of galena particles in an ore.** Ph.D. thesis, The University of Queensland, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Department of Mining, Minerals and Materials Engineering, 337 pp.

WALTERS, S.G., 2008. **An overview of new integrated geometallurgical research.** Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, pp. 79-82.

WELLER, K.R., MORRELL, S., GOTTLIEB, P., 1996. **Use of grinding and liberation models to simulate tower mill circuit performance in a lead/zinc concentrator to increase flotation recovery.** International Journal of Mineral Processing 44-45, 683-702.

WELSBY, S.D.D., VIANNA, S.M.S.M. and FRANZIDIS, J-P., 2010. **Assigning physical significance to floatability components.** International journal of Mineral Processing, 97, 54-67.