



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



PEDRO CÉSAR PEREIRA GONÇALVES

GEOMETALURGIA: PANORAMA DE APLICAÇÃO NO SETOR MÍNERO-METALÚRGICO

OURO PRETO - MG

2017

PEDRO CÉSAR PEREIRA GONÇALVES

GEOMETALURGIA: PANORAMA DE APLICAÇÃO NO SETOR MÍNERO-
METALÚRGICO

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral

OURO PRETO - MG

2017



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 07 dias do mês de agosto de 2017, às 14h30min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado “**GEOMETALURGIA: PLATAFORMA DE APLICAÇÃO NO SETOR MÍNERO-METALÚRGICO**”, pelo aluno **Pedro César Pereira Gonçalves**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral (orientador)**, **Prof. M.Sc. José Fernando Miranda** e **Eng^o Metalurgista Lucas Sanches Magalhães**.

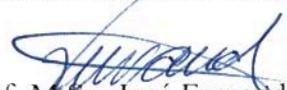
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela aprovação do candidato, com a nota 10,0 concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

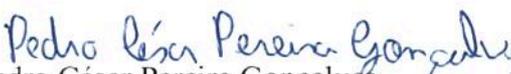
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 07 de agosto de 2017.


Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Membro da Comissão Avaliadora


Eng^o Metalurgista Lucas Sanches Magalhães
Membro da Comissão Avaliadora


Pedro César Pereira Gonçalves


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

À minha família pela confiança

e todo o apoio nessa jornada

AGRADECIMENTOS

À Deus, por estar sempre comigo e me fazer mais forte nos momentos de maiores necessidades.

Ao Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral pelas correções, orientações e apoio neste trabalho de conclusão.

Ao meu pai Paulo César e minha mãe Sara Cristina, pela imensa dedicação a mim destinada e por serem meus exemplos de honestidade e comprometimento.

Ao meu irmão Thiago, por ser um exemplo a ser seguido com seu formidável desempenho acadêmico.

Aos recentes amigos do Programa Ciência sem Fronteiras da West Virginia University e da University of Tennessee pela contínua troca de conhecimentos e a amizade.

Aos amigos conquistados durante todo esse tempo em Ouro Preto, por compartilharem conhecimentos e experiências e por tornarem a graduação uma fase inesquecível. Aos irmãos, moradores e ex-alunos, da República Babilônia por terem feito desse o melhor período da minha vida.

A todos acima mencionados, meu eterno agradecimento. Foram muito importantes para que este caminho fosse trilhado com êxito. Por último, minha gratidão por ter estudado em uma das mais renomadas instituições de ensino do Brasil, a grandiosa Escola de Minas de Ouro Preto e o agradecimento aos queridos professores do DEMIN, que me propiciaram um ensino de alta qualidade.

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim”

(Nikola Tesla)

RESUMO

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.

Entende-se por geometalurgia uma ferramenta relativamente recente que correlaciona as áreas da geologia e metalurgia com o objetivo de originar um modelo espacial carregado de informações, sendo este capaz de prever o comportamento de um minério na planta de processamento mineral. Como indicado na própria definição do nome, essa ferramenta é de caráter multidisciplinar. Sua importância é traduzida pelo fato de que quando implementada em empreendimentos mineiros, acarreta na diminuição das fronteiras existentes entre os profissionais especialistas no conhecimento das características do depósito mineral, e outros, responsáveis pelas operações mineiras e a planta de beneficiamento mineral. Esse maior conhecimento agregado acerca do corpo mineralizado e suas influências ao longo de processo representam a minimização das variabilidades, tem-se então redução dos riscos quanto à capacidade de produção da mina e ganhos financeiros otimizados. O presente trabalho visa por meio de uma Revisão Bibliográfica, congrega as análises englobadas pela geologia e metalurgia culminando em um Programa Geometalúrgico, nada mais que a aplicação industrial do conceito de geometalurgia, que será utilizado no planejamento da lavra e das unidades operacionais da planta de processamento. Conclui-se que em um cenário de transformações no setor mínero-metalúrgico, onde os depósitos de minerais estratégicos explorados possuem teores cada vez mais baixos e a sustentabilidade deve nortear a ação de todas as grandes empresas, novos projetos de mineração devem integrar a abordagem geometalúrgica desde as fases de exploração e prospecção, conscientizando os corporativistas mais influentes do setor que essas tecnologias não representam dispêndio de capital e sim otimização dos recursos a longo prazo.

Palavras-chave: Geometalurgia, Processamento Mineral, Programa Geometalúrgico, Variabilidades, Planejamento Mineiro.

ABSTRACT

GONÇALVES, Pedro C. Pereira. **Geometalurgia: Panorama da Aplicação no Setor Mineral-Metalúrgico**. 2017. 90 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – MG.

Geometallurgy is a relatively recent tool that correlates geology and metallurgy with the objective of generating an information loaded spatial model, which is capable of predicting the behavior of an ore in the mineral processing plant. As indicated by the name definition itself, this tool has multidisciplinary character. Its importance is due to the fact that when implemented in mining projects, it reduces the existing boundaries between professionals who are experts in the knowledge of the characteristics of the mineral deposit, and others who are responsible for the mining operations and the mineral processing plant. Such greater knowledge regarding the mineralized body and its influences throughout the process represents the minimization of variability, thus reducing the risks of the production capacity of the mine and optimizing financial gains. The present work aims, through a Literature Review, to bring together the analyzes encompassed by geology and metallurgy culminating in a Geometallurgical Program, nothing more than the industrial application of the geometallurgy concept, which will be used in mine planning solutions and the operational units of the mineral plant processing. It is conclusive that in a scenario of transformations in the mining-metallurgical sector, where the strategic mineral deposits exploited have increasingly lower levels and sustainability must guide the action of all large companies, new mining projects must integrate the geometallurgical approach from the beginning. Making the most influential corporatists from the industry aware that these technologies do not represent capital expenditures but rather long-term resources optimization.

Keywords: Geometallurgy, Mineral Processing, Geometallurgical Program, Variabilities, Mine Planning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<i>Figura 1.1: Uma abordagem do Conceito de Geometalurgia.</i>	18
<i>Figura 1.2: Estrutura de um Programa Geometalúrgico.</i>	20
<i>Figura 1.3: As variáveis geometalúrgicas.</i>	21
<i>Figura 1.4: Tipologias de diferentes corpos de minério, do depósito de minério de Fe de Malmberget, Suécia. A) Magnetita, granulometria fina, B) Magnetita, granulometria grosseira, C) Minério rico em Apatita, D) Minério Anfíbolítico grosso, E) Minério Anfíbolítico fino.</i>	22
<i>Figura 1.5: Modelo Geometalúrgico e suas componentes.</i>	25
<i>Figura 2.1: Perfil Litológico do Quadrilátero Ferrífero.</i>	27
<i>Figura 2.2: Ambiente tectônico e os tipos de formações ferríferas associadas.</i>	28
<i>Figura 2.3: A qualidade da flotação é função do tamanho dos grãos e textura. Minérios com intercruzamentos de grãos grossos e finos de pirita, calcopirita e esfalerita, por exemplo, limitam uma boa flotação.</i>	32
<i>Figura 2.4: Fotomicrografias compostas por Cristais de Hematita Lamelar, Granular, Especular e Martita, respectivamente. Análise por Microscopia Óptica de Luz Refletida.</i>	36
<i>Figura 2.5: Sequência de etapas da análise via QEMSCAN®, para Identificação de Minerais e Quantificação de Elementos</i>	37
<i>Figura 2.6: Classificação Geométrica e Características de Liberação de Texturas Minerais.</i>	40
<i>Figura 2.7: Fotomicrografias apresentando os quatro tipos de partículas mistas descritas por Gaudin sendo (a) espécies justapostas, (b) veios, (c) recobrimento e (d) inclusões.</i>	42
<i>Figura 3.1: Fluxograma Simplificado de um Circuito de Cominuição Típico Simulado.</i>	47
<i>Figura 3.2: Métodos de testes para obtenção de dados ligados à etapa de cominuição na Geometalurgia, a matriz se divide em níveis de profundidade de escala e o tamanho de partícula em que se trabalha.</i>	49
<i>Figura 3.3: Esquema representativo para uma célula de flotação de espuma, e o contato bolha-partícula.</i>	52
<i>Figura 3.4: Circuito de Flotação.</i>	53
<i>Figura 3.5: Comparativo entre as curvas de Recuperação de Cobre Modelada (Azul) e a Recuperação de Cobre Observada na prática (Rosa), para diferentes composições de UGM's no blend da alimentação do circuito.</i>	55
<i>Figura 4.1: Preenchendo o Modelo de Blocos Geometalúrgico.</i>	57
<i>Figura 4.2: Matriz de Correlação e Modelo de Regressão para a Recuperação Mássica.</i>	59
<i>Figura 4.3: Exemplo do “nível 1” de agrupamento de variáveis para confecção do modelo.</i>	60
<i>Figura 4.4: Variogramas segundo as direções preferenciais e a vertical para a variável mineralógica magnetita global e um mapa variográfico para a mesma variável.</i>	62

<i>Figura 4.5: Krigagem dos indicadores em a) grid global e b) grid rico em detalhes (zona de interesse).</i>	65
<i>Figura 5.1: Etapas na Construção de um Programa Geometalúrgico.</i>	67
<i>Figura 5.2: O Link entre as características do Corpo de Minério (Geológicas) e do Processo (Metalúrgicas) para as diferentes abordagens geomet.</i>	69
<i>Figura 5.3: Classificação Matricial dos Programas Geometalúrgicos, profundidade da aplicação do programa para as diferentes abordagens geometalúrgicas.</i>	69
<i>Figura 5.4: Nível de Geometalurgia aplicada em algumas minas e plantas de beneficiamento de classe mundial, para minérios diversos.</i>	70
<i>Figura 5.5: Comparativo do Modelo Determinístico x Modelo Estocástico para estimativa do VPL em Planejamentos de Mina.</i>	72
<i>Figura 5.6: As figuras demonstram como o CEET e FLEET trabalham juntos para gerenciar o risco associado à determinação e controle dos componentes custo/receita das operações unitárias de Cominuição e Flotação.</i>	76
<i>Figura 6.1: “Ciclo de Vida” de um Aparelho Celular, com reciclagem de metais de valor. “Ecogeometalurgia”.</i>	78
<i>Figura 6.2: Esquema representativo de diferentes unidades biogeometalúrgicas em um corpo de minério de Cobre Porfíritico.</i>	80

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1.1: Exemplificação de Número de Amostras possíveis para cada tipo de análise.</i>	23
<i>Tabela 1.2: Testes e Ensaios comuns para Caracterização do Minério.</i>	23
<i>Tabela 1.3: Link entre fatores geológicos/mineralógicos e fatores metalúrgicos.</i>	24
<i>Tabela 3.1: Classificação dos Testes para diversas etapas constituintes do Modelo de Processo.</i>	45
<i>Tabela 3.2: Principais Processos de Concentração e os equipamentos utilizados.</i>	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIF – *Banded Iron Formation* (Formações Ferríferas Bandadas).

BWi - *Bond work index* (Índice de Ensaio de Bond).

CEET - Comminution Economic Evaluation Tool.

DAM – Drenagem Ácida de Mina.

e.g. – do latim “*exempli gratia*” (Exemplo).

ETR – Elementos Terras-Raras.

FA – Função Aleatória.

FLEET - Flotation Economic Evaluation Tool.

Geomet. – Geometalurgia/Geometalúrgico.

QEMSCAN® - *Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy* (Avaliação Quantitativa de Minerais por Microscopia Eletrônica de Varredura).

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura.

MLA – *Mineral Liberation Analyzer* (Analisador de Liberação Mineral).

MOLR – Microscópio Óptico de Luz Refletida.

NPV – *Net Present Value* (Valor Presente Líquido - VPL).

P80 – 80% de material passante para uma determinada classificação granulométrica.

REEE - Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos.

SAG - *Semi-autogenous mill* (Moagem Semi-Autógena).

SEM – Scanning Electron Microscope.

SPI - *SAG power index test* (Índice de Moagem SAG).

UGM – Unidade Geometalúrgica.

XRD – X-Ray Diffraction.

WI – Work Index.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO GERAL	20
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
1.3	ESTADO-DA-ARTE: O MODELO GEOMETALÚRGICO	21
2	O MODELO GEOLÓGICO	26
2.1	GEOLOGIA E METALOGÊNESE	26
2.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA.....	29
2.3	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA: MINERALOGIA DE PROCESSO	31
3	O MODELO DE PROCESSAMENTO MINERAL.....	44
3.1	O MODELO DE COMINUIÇÃO	46
3.2	O MODELO DE CONCENTRAÇÃO/SEPARAÇÃO	50
4	MODELAGEM GEOMETALÚRGICA.....	56
4.1	ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR.....	58
4.2	MODELAGEM GEOESTATÍSTICA	61
5	GERENCIAMENTO E APLICAÇÃO DOS MODELOS GEOMETALÚRGICOS....	67
5.1	O PROGRAMA GEOMETALÚRGICO.....	67
5.2	MODELO DE PRODUÇÃO	71
6	GEOMETALURGIA E AS PERSPECTIVAS FUTURAS	77
6.1	ECOMETALURGIA E AS MINAS URBANAS (<i>URBAN MINES</i>)	77
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

A Geometalurgia é hoje o “Estado da Arte” em se tratando das ferramentas de otimização disponíveis no setor Minero-Metalúrgico. Mais que uma técnica e sim um procedimento a ser adotado no desenvolvimento de uma mineração sustentável.

Apesar de por vezes a insatisfação popular, e o acontecimento de desastres que envolvam a prática da mineração, atravancarem os investimentos e a apreciação geral sobre o setor, a demanda crescente e o constante avanço tecnológico da humanidade exigem que se continue investindo na extração mineral. A necessidade de inovação neste setor é considerável, uma vez que os novos depósitos estão cada vez mais difíceis de processar devido à um teor decrescente dos minérios lavráveis e às severas legislações impostas sobre as atividades mineradoras. Essas inovações só serão possíveis com uma compreensão profunda da geologia integrada durante toda a vida da mina, desde a mineração até a reabilitação da área/fechamento da mina. A geometalurgia surge de forma a aplicar tais características geológicas em novos modelos baseados na eficiência em se utilizar recursos minerais primários. Isso requer, compreensão dos fatores geológicos, capacidade de relacionar e aplicar as características geológicas com os processos minerais industriais, compreensão das técnicas avançadas de processamento que maximizam as recuperações dos minérios e sensibilização para as questões ambientais, económicas e sociais na mineração (EMerald - Erasmus Mundus Master in Georesources Engineering, 2017; VIEIRA, 2016).

A ferramenta se baseia em uma abordagem interdisciplinar, sendo as disciplinas de maior destaque durante um estudo geometalúrgico a Geologia e Mineralogia, o Planejamento de Mina, o Processamento Mineral(Metalurgia) e a Geoestatística, o conhecimento e a obtenção de dados do corpo de minério atrelados à essas disciplinas supracitadas, se traduzem na confecção de um modelo preditivo para descrever a variabilidade do depósito de minério de forma regional/local, o que gera ganhos e reduz riscos (menos incertezas na produção). Esse modelo geometalúrgico será utilizado no planejamento de lavra e na gestão da produção. A geometalurgia vem ganhando atenção nos últimos anos e atualmente, os empreendimentos mineiros vêm mudando radicalmente seus paradigmas. Longe estão os dias em que a Geologia, a Mineração e a Metalurgia, áreas

distintas, mas com vários elos que as conectam, atuavam sem um idioma comum e de maneira não-interligada.

Em tempos não tão distantes, tomando como base um empreendimento mineiro, o profissional na figura do Geólogo, realizava os estudos de um já conhecido depósito mineral se preocupando somente com teores e volumes dos minerais-minério presentes naquele terreno, o Engenheiro de Minas, recebia essa informação, e sem o devido *know-how* da Caracterização Mineralógica dos seus recursos, iniciava o planejamento da mina, de forma a conceber uma cava ótima, com excelentes produções em toneladas brutas, o chamado *Run of Mine(ROM)*. Por fim o Engenheiro responsável pelo beneficiamento desse minério, normalmente o Metalurgista, recebia todo esse material, ponderando apenas a Recuperação Metalúrgica que seria alcançada ao findar o processo.

A mineração evoluiu e, hoje em dia, essa lógica de trabalho já não existe, observando-se que os estudos são integrados, cada parte componente tem participação na tomada de decisões, tornando-se assim uma atividade com enfoque multidisciplinar, que requer uma preparação e visão técnico-econômica bem definida. Atuando dessa forma, será possível atender às limitações impostas a esse mercado, que deve ser cada vez mais embasado em práticas eficientes e sustentáveis de extração e disposição de rejeitos do processo (ARROYO O., 2014; LAMBERG. *et al.*, 2015; LAMBERG *et al.*, 2013a; FERNANDES, 2013; LAMBERG & LUND, 2014).

A falta de informações sobre a Geologia dos depósitos e a variação espacial(Geoestatística) das mineralizações, configurou um cenário em que a maioria das empresas tratava seu corpo de minério como algo homogêneo e sem variações, as consequências desse total desconhecimento do comportamento do bem mineral em subsuperfície, renderam alguns prejuízos para a indústria mineral na maioria das vezes, causada por produtos minerais que fugiam das especificidades iniciais, e corpos que se tornavam empobrecidos em profundidade.

Alguns dos principais problemas enfrentados pela falta da incorporação desses estudos geometalúrgico em um empreendimento mineiro/beneficiamento mineral são: A recuperação metalúrgica ineficiente em diversas plantas de beneficiamento, a utilização incompleta dos

recursos, a produção não otimizada, a má gestão de riscos e a projeção de valores metalúrgicos (grau e recuperação) baseadas em poucas amostras. (LAMBERG, 2011a; RIBEIRO, 2008)

Segundo ARROYO ORTIZ (2014), a modelagem geometalúrgica é aplicada ao modelo de blocos, que recebem valores das variáveis estudadas e amostradas no depósito, auxiliada pela Geoestatística, para inferência de variabilidade regional de algumas dessas grandezas. Simulações do modelo são geradas para planejar diferentes operações na mina, e.g. moagem, flotação e disposição de rejeitos. A figura 1.1 aborda um fluxograma piramidal em torno da definição conceitual de um modelo geometalúrgico, e como este está condicionado à uma sequência de etapas.

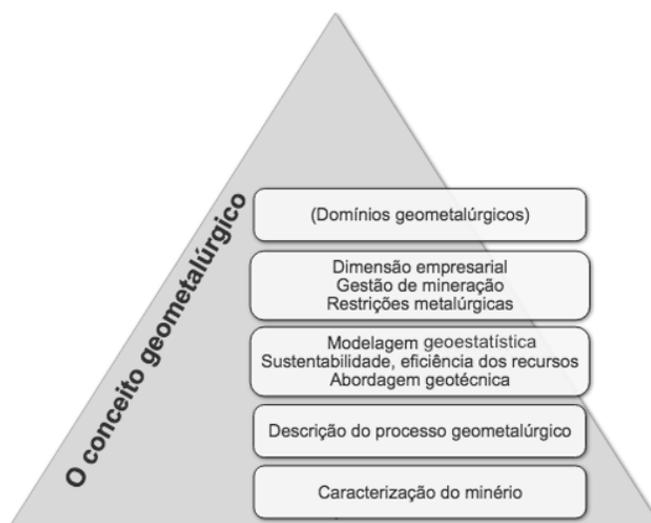


Figura 1.1: Uma abordagem do Conceito de Geometalurgia.
Fonte: Adaptado de (LUND, 2013)

O primeiro nível, Caracterização do Minério (Mineralogia, Texturas, etc.), traz à tona o desafio de agregar conhecimento para o processo, passando informações mais palpáveis (quantitativas), para a discussão entre geólogos e metalurgistas. O segundo nível inclui o estudo do processamento mineral e comportamento metalúrgico, muitas vezes com trabalhos em escala de laboratório e escala de planta piloto. Esses processos envolvem diferentes testes geometalúrgicos, na qual a expectativa é obter um modelo que forneça uma resposta metalúrgica das amostras do minério sob diferentes métodos de beneficiamento. Por fim, os níveis superiores na pirâmide são fatores

externos que influenciam o resultado geometalúrgico, questões de cunho econômico, a forma com que é realizada a gestão do empreendimento mineiro e os “gargalos” do processo. Obviamente, esses níveis são estritamente relacionados às flutuações financeiras da economia mundial. (LUND, 2013)

A modelagem constitui uma abordagem preditiva, precisa e confiável; assumindo total controle de variáveis que interferem direta ou indiretamente no processo, tais como minerais de ganga, teor do minério, work index, consumo de reagente, granulometria, liberação do minério, dureza, moabilidade, entre outros, fornecendo conhecimento aplicável:

- ao Aperfeiçoamento do desempenho do beneficiamento mineral;
- à Redução das frações de resíduos e finos gerados;
- à Otimização das táticas de planejamento e blendagem de minério a curto e médio prazo (seleção de blocos);
- à Utilização eficiente de energia e água de processo.

O prognóstico gerado pelo modelo é dinâmico e sofre variações dependentes da alimentação de minério para a planta de beneficiamento, as flutuações de valores de mercado ditas anteriormente e até mesmo eventos frequentemente desapercibidos como a manutenção dos equipamentos ou a introdução de novas tecnologias de processamento. Para realizar um estudo amplo desses diversos cenários possíveis no empreendimento, faz-se uso de simulações discretas e contínuas empregando técnicas numéricas e geoestatísticas a partir do modelo geometalúrgico que se trabalha. O processo de criação, manutenção e utilização de um modelo geometalúrgico é chamado “Programa Geometalúrgico”, e sua estrutura é apresentada na figura 1.2 (ARROYO ORTIZ, 2014; FERNANDES, 2013; LISHCHUK, 2016; SGS Mineral Services, 2013; COWARD *et al.*, 2009)

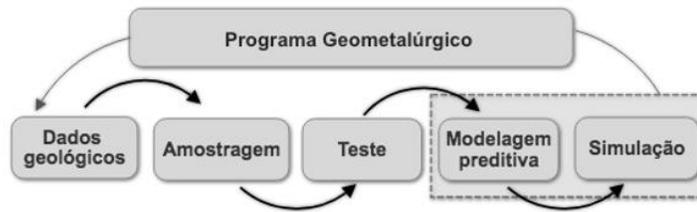


Figura 1.2: Estrutura de um Programa Geometalúrgico.
 Fonte: Adaptado de (LISHCHUK, 2016)

1.1 OBJETIVO GERAL

Examinar a Geometalurgia, descrevendo as principais componentes de uma Modelagem Geometalúrgica, estudando cada uma delas de forma introdutória, porém com embasamento científico.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Concepção de um Modelo Geometalúrgico e a influência de um diagnóstico preditivo sobre o Planejamento Mineiro e as Plantas de Beneficiamento em uma mina;

Apresentar possibilidades incipientes para aplicação da Geometalurgia.

1.3 ESTADO-DA-ARTE: O MODELO GEOMETALÚRGICO

Um modelo geometalúrgico combina a Geologia e o Processamento Mineral para criar um modelo espacial do corpo mineralizado respaldando o planejamento e gerenciamento do empreendimento mineiro. Tendo em vista a possibilidade de simulação de diferentes cenários de produção esse conceito deve ser implementado tão logo no estágio de exploração mineral, passando pelos estudos de viabilidade do depósito e elaboração da planta de beneficiamento. Sabe-se que hoje a maioria das minas não possui um modelo geometalúrgico regendo suas ações de planejamento a curto/longo prazo. Porém, essa ferramenta passa a ser o “estado da arte” em se tratando de uma utilização mais eficaz dos recursos minerais, e vem se tornando cada vez mais comum no setor minero-metalúrgico (LAMBERG & LUND, 2014).

As variáveis geometalúrgicas, figura 1.3, guiam os custos e receitas de um projeto de forma fundamental. Uma Caracterização Geometalúrgica funcional, deve permitir aplicação direta da interpretação dos resultados no Planejamento da Mina e no Beneficiamento Mineral. Quando, por ferramentas do campo da Geoestatística, se criam estimativas espaciais dessas variáveis, a análise deve ser minuciosa, visto que ao contrário dos teores minerais, por exemplo, essas grandezas geometalúrgicas não costumam se dispor de forma linear e aditiva (WILLIAMS & RICHARDSON, 2004; DUNHAM & VANN, 2007).



Figura 1.3: As variáveis geometalúrgicas.
Fonte: Adaptado de (WILLIAMS & RICHARDSON, 2004)

Em suma, a Caracterização é a quantificação de dados físicos a partir de amostras que representam um corpo de minério (LUND, 2013). Essas amostras serão definidas após intensos trabalhos de mapeamento (geológico, geofísico) e avaliação visual do depósito, dessa forma as principais tipologias presentes no domínio geológico regional e local do depósito serão contempladas na amostragem. A figura 1.4 ilustra como um mesmo depósito pode ter corpos de minério de tipologias altamente distintas.

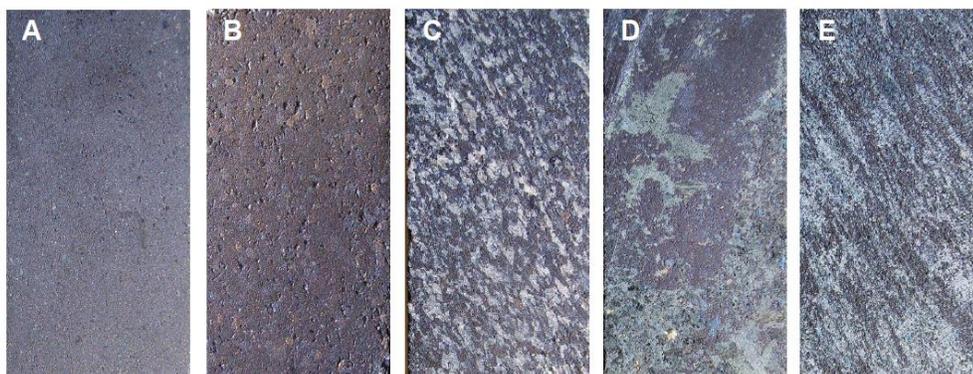


Figura 1.4: Tipologias de diferentes corpos de minério, do depósito de minério de Fe de Malmberget, Suécia. A) Magnetita, granulometria fina, B) Magnetita, granulometria grosseira, C) Minério rico em Apatita, D) Minério Anfibolítico grosso, E) Minério Anfibolítico fino.
Fonte: (LUND, 2013)

Após definidas as tipologias/corpos que irão ceder amostras para análise, essas são coletadas por testemunhos provenientes de núcleo de brocas utilizadas para perfuração, ou de afloramentos rochosos do depósito. O número de amostras analisadas por testes, tabela 1.1, depende de uma série de fatores, tais como: a complexidade ou tamanho da matriz geometalúrgica, o custo para obter as amostras, o valor esperado ou necessário do programa geometalúrgico e qual o peso de se analisar a variabilidade do corpo mineralizado para mitigação de riscos técnicos e econômicos do projeto (LUND, 2013; WILLIAMS & RICHARDSON, 2004).

Tabela 1.1: Exemplificação de Número de Amostras possíveis para cada tipo de análise.

TIPOS DE TESTE	NÚMERO
Ensaio	10000++
Mineralogia	1000+
Cominuição	100 – 300
Ensaio Metalúrgico (e.g. flotação)	100 – 300

Fonte: Adaptado de (WILLIAMS & RICHARDSON, 2004)

A partir dos testemunhos, são realizados os mais diversos ensaios macro e microscópicos. Muitas técnicas para Caracterização do Minério foram desenvolvidas nas últimas três décadas em consequência da disponibilidade de novos equipamentos, advindos do alto investimento em avanços tecnológicos nesse setor. Os principais testes são exemplificados na tabela 1.2, e alguns deles serão abordados com mais detalhes nos próximos tópicos deste trabalho (ARROYO ORTIZ, 2014; LUND, 2013; PETRUK, 2000).

Tabela 1.2: Testes e Ensaio comuns para Caracterização do Minério

DISCIPLINA	PARÂMETROS	TESTES POSSÍVEIS
Geologia	Relações de campo	Mapeamento Geológico, Perfuração (Testemunhos)
Química	Teores	Ensaio Químico
Mineralogia	Zoneamento	Identificação mineral, Associações, Dist. Tamanhos, Texturas e Liberação via QEMSCAN
Propriedades Físicas	Dureza; Cominuição	Ensaio de Bond, Drop Weight, Índice SPI
Resposta Metalúrgica	Recuperação	Cinética de Flotação, Ensaio de Rolo da Garrafa (Cianeto), Testes de Ciclo Fechado
Parâmetros Geotécnicos	Preparação do terreno, Questões ambientais	Densidade do Solo, Pressão Fluxo de Água Subterrânea, Estabilidade de Taludes

Fonte: Adaptado de (WILLIAMS & RICHARDSON, 2004).

Segundo ARROYO ORTIZ (2014), por meio do estudo e conhecimento da composição mineralógica das amostras proveniente da mina ou depósito analisado em questão, aliado aos dados de composição química das amostras podemos obter uma previsão do comportamento metalúrgico de um material, que pode variar por diversos fatores, inclusive dois minerais de mesma composição, mas hábitos diferentes, e.g. Hematita Lamelar ou Especular, podem se comportar de maneira dessemelhante no tratamento. Todas essas variáveis, provenientes principalmente de análises químicas, mineralógicas e metalúrgicas, quando conectadas, nos fornecem a Caracterização Geometalúrgica de um minério estudado. A tabela 1.3 apresenta como os parâmetros de atribuição geológica/mineralógica como a dureza ou a presença de certos minerais, podem ser “linkados” à diferentes operações unitárias de beneficiamento (Metalurgia).

Tabela 1.3: Link entre fatores geológicos/mineralógicos e fatores metalúrgicos.

FATOR GEOLÓGICO/ MINERALÓGICO	ÁREA DE LINK	OPERAÇÃO METALÚRGICA UNITÁRIA
Tipologias de Rochas	Dureza	Cominuição
Assembleias Mineraias e Processos formadores de minério	Solubilidade, Presença de talco, Dureza	Cominuição, Flotação, Lixiviação
Alteração Geológica <ul style="list-style-type: none"> • Hidrotermalismo • Intemperismo • Supergênese 	<ul style="list-style-type: none"> • Presença de Argilas, Dureza • Solubilidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Cominuição, Separação S/L • Lixiviação, Purificação
Falhamentos Geológicos	Argilas, oxidação	Separação S/L, Flotação
Metamorfismo	Argilas, presença de talco, dureza	Cominuição, Separação S/L, Flotação

Fonte: Adaptado de (WILLIAMS & RICHARDSON, 2004).

Em suma, com base em (LAMBERG, 2011a & LAMBERG et al., 2013a) o Modelo Geometalúrgico se subdivide em três componentes, conforme figura 1.5, abaixo explanados:

1 - **O Modelo Geológico:** fornece uma boa caracterização do minério e dados mineralógicos quantitativos como a composição modal e dados texturais e da liberação das partículas relacionados às assembleias minerais e distribuição do tamanho dos grãos

2 - **O Modelo de Processamento Mineral:** recebe a informação do modelo geológico e engloba os dados obtidos para prever o desempenho metalúrgico dos minerais do minério em questão. A cominuição, separação entre outras operações unitárias são combinadas, possibilitando o estudo da resposta metalúrgica de qualquer bloco de minério.

3 - **O Modelo de Produção/Planejamento:** com a combinação dos modelos anteriores, esse modelo é usado para gerenciar a produção, que inclui o planejamento da mina a curto/longo prazo e um prognóstico econômico que aborde custos de produção e as variações de mercado.

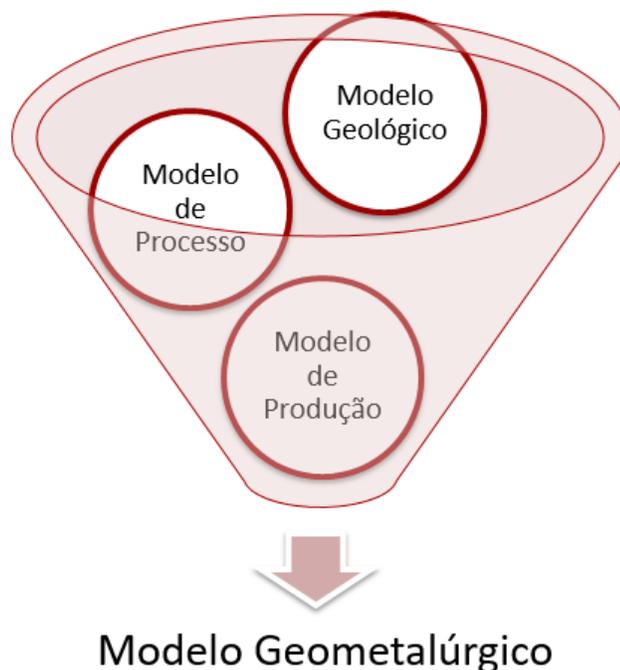


Figura 1.5: Modelo Geometalúrgico e suas componentes

2 O MODELO GEOLÓGICO

2.1 GEOLOGIA E METALOGÊNESE

O conhecimento geológico do minério é pautado pelo processo evolutivo da rocha em escala macro cronológica. As diferentes intensidades de eventos geológicos que afetaram os maciços rochosos permitem gerar corpos mineralizados com sequências de cristalização dos minerais distintas, por exemplo, além da morfologia, tamanho, arranjo e textura dos cristais minerais. (TAKEHARA, 2004). A isso se deve a importância de um entendimento básico das feições geológicas de caráter menos investigativo do que a mineralogia para os estudos geometalúrgicos, como a Geologia Estrutural e a Litologia dos depósitos.

De acordo com LUND (2013), o registro dos testemunhos obtido das perfuratrizes é sempre fundamental para a caracterização adequada do minério. O desafio ao estudar novos depósitos é obter uma visão geral da variabilidade geológica regional/local dos corpos de minério antes da fase de estudos de viabilidade.

Num contexto geometalúrgico, é de extrema importância que as informações geológicas sejam quantitativas, e é um desafio realizar tais operações com baixo custo e de forma rápida e sistemática. As técnicas para a interpretação geológica dos testemunhos obtidos devem ser preferencialmente automatizadas. (KOCH, 2013; LAMBERG *et al.*, 2013b; LUND & LAMBERG, 2014)

Conhecer o caráter litológico do depósito onde se insere o minério é importante por várias razões na mineração e geometurgia. Em primeiro lugar, as propriedades mecânicas e a estabilidade da rocha encaixante determinam o método de mineração, o tamanho dos túneis e os suportes necessários (Lavra Subterrânea). Em segundo lugar, uma pequena parte da rocha hospedeira acabará na alimentação da planta devido à diluição dos minerais na encaixante. Por último é comum que as características do minério sofram variações de acordo com a rocha matriz desse corpo mineralizado, o que acarreta em uma ferramenta auxiliar na interpretação dos dados geológicos obtidos.

Como abordado nos estudos de LUND (2013), o minério de ferro nos depósitos de Malmberget, no norte da Suécia, é guarnecido por rochas vulcânicas fortemente metamorfoseadas e deformadas. Devido a esta forte recristalização, o caráter e a estratigrafia local das rochas encaixantes é bastante complexa. A identificação de diferentes litologias primárias está demonstrada na figura 2.1; que representa um perfil geológico conceitual do Quadrilátero Ferrífero mineiro.

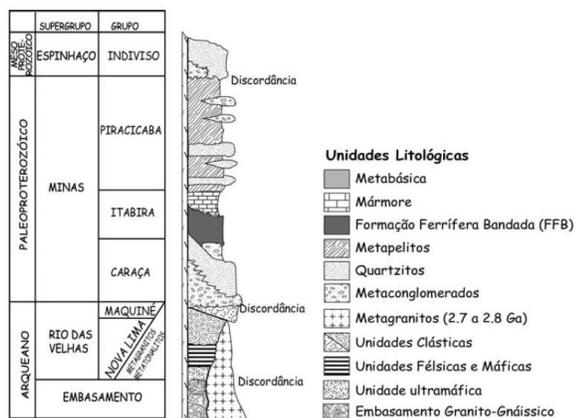


Figura 2.1: Perfil Litológico do Quadrilátero Ferrífero.
Fonte: CHEMALE & TAKEHARA, 2013

Segundo CHEMALE & TAKEHARA (2013), compreende-se por geologia regional de um depósito: a descrição das encaixantes, idade (escala geológica), tipos de minério, dimensão dos corpos mineralizados, dentre outras características relevantes. Tomando como exemplo os depósitos de minério de ferro, temos sua classificação em 5 (cinco) categorias principais:

Depósitos Sedimentares Acamadados ou BIF's (Formações Ferríferas Bandadas) – Tipos Algoma, Carajás, Superior ou Rapitan; Depósitos relacionados a atividades magmáticas ou vulcânicas – Tipo Kiruna; Depósitos por Metamorfismo de Contato – Tipo Skarn; Depósitos Sedimentares Oolíticos – Tipo Clinton-Minette e Depósitos resultantes de Alteração e Acúmulo em Superfície; sendo os dois primeiros tipos, os depósitos considerados de “classe mundial”, pois contêm as maiores reservas de ferro do planeta.

A Metalogênese (estudos geológicos relacionados à origem/tectonismo e evolução de jazidas ou concentrações minerais) desses depósitos, principalmente o enriquecimento dos mesmos deve-se a

fatores de ordem atmosférica, hidrosféricas, litosféricas e biosféricas. Essa gênese não será objeto de estudo profundo nesse trabalho, visto que, apesar da importância principalmente acadêmica de tal, grande parte dos estudos geometalúrgicos em torno do minério de ferro, e dos outros metais, tem sido voltada para o conhecimento das características dos tipos de minério e seus comportamentos em aplicações na metalurgia, de modo a aumentar os rendimentos do processo industrial. A imagem a seguir mostra apenas um esboço da origem dos principais depósitos do tipo BIF.

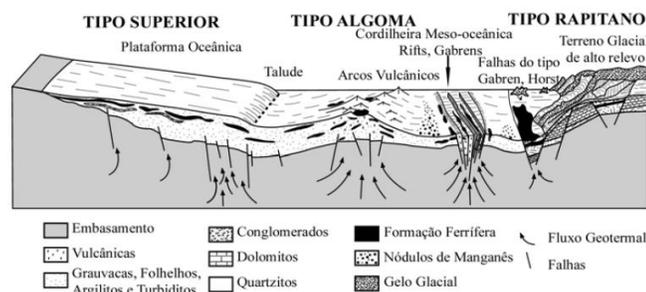


Figura 2.2: Ambiente tectônico e os tipos de formações ferríferas associadas.
 Fonte: CHEMALE & TAKEHARA, 2013

2.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A caracterização química sempre é incorporada aos mapeamentos geometalúrgicos e fornece dados para a construção mais típica de modelo de blocos. Existe uma íntima relação entre a composição mineralógica e química de uma rocha/mineral, dessa forma, as informações obtidas das análises químicas possibilitam interpretações mineralógicas ou metalúrgicas mais aprofundadas. Em se tratando das rochas, o cálculo normativo é o método mais utilizado para caracterização química com base nos teores de elementos principais (ARROYO ORTIZ, 2014).

A operação da planta de processamento mineral é determinada pelos minerais presentes em dado minério. Entretanto, é comum se obter dados da composição mineralógica dos minérios através da análise química desse material. A mineralogia automatizada, e.g. microscopia eletrônica de varredura (MEV), fornece uma análise muito eficaz da composição modal mineralógica e das texturas minerais, todavia, existem algumas desvantagens, principalmente em relação à custos.

Uma vez que os ensaios químicos dos elementos são obtidos com maior facilidade e menor custo, é interessante determinar quando a composição mineral pode ser determinada de forma confiável a partir desses ensaios. O método de conversão elemento-mineral surgiu como uma técnica relativamente simples de estimar a composição modal mineralógica através da resolução simultânea de um conjunto de equações de balanço de massa formuladas entre elementos químicos e minerais (WHITEN, 2008). Sua aplicabilidade, porém, é restrita a mineralogias relativamente simples, onde o número de espécies minerais não seja maior que o número de componentes analisados e a composição química dos minerais deve ser conhecida. Matematicamente, isso pode ser escrito da seguinte forma:

$$A \times x = b ; \quad \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

Onde A é a Matriz - Composição Química dos minerais, x é um vetor que inclui a proporção em massa de minerais na amostra (desconhecida) e b é o vetor da análise da composição química da amostra. (WHITEN, 2008; PARIAN, 2015; LAMBERG *et al.*, 2013b; LAMBERG *et al.*, 2015)

Em linhas gerais, podemos definir as análises químicas úteis à geometalurgia em duas categorias:

1) Análise química via úmida;

Em geral, envolve a dissolução de um mineral em meio ácido. As principais técnicas utilizadas são análises químicas: gravimétrico, volumétrica, colorimétrica. Todas requerem amostras minerais relativamente "puras". Amostras com tal pureza são dificilmente encontradas na natureza e isso contribuiu para que esse tipo de análise se tornasse cada vez mais obsoleta, dando lugar as técnicas amplamente utilizadas de Espectroscopia.

2) Espectroscopia in situ;

Apesar da variedade de técnicas espectroscópicas, todos envolvem uma fonte de energia (elétrons/nêutrons) que bombardeia amostras, gerando um sinal/espectro eletromagnético (frequências/comprimento de onda) detectável que é então analisado.

Atualmente as análises químicas de rochas e minerais são feitas em instrumentos capazes de determinar mais de 40 elementos com uma rapidez incrível.

Entre as técnicas comumente utilizadas para análises químicas em minerais, podemos citar:

- Espectroscopia de absorção atômica (AAS);
- Fluorescência de Raios-X (XRF);
- Espectroscopia de Raman;
- Espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP – MS);
- Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS/EDX). (SAIKKONEN, 1996; Geology UMass; LAMBERG *et al.* , 2015).

2.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA: MINERALOGIA DE PROCESSO

A mineralogia aplicada na indústria de mineração consiste em utilizar informações mineralógicas e texturais para a compreensão, dimensionamento das rotas processuais e solução/otimização de problemas encontrados durante as seguintes etapas:

- Exploração Mineral: locação de depósitos minerais, potencial de recuperação de certos minerais/elementos e comportamento de minérios durante o processamento;
- Processamento Mineral: produzir concentrados com recuperação metálica ótima e rejeitos que possam ser dispostos de forma ambientalmente sustentável;
- Disposição e Tratamento de Rejeitos: determinar viabilidade econômica na recuperação de outros minerais e liberação de elementos perniciosos ao ambiente;
- Hidrometalurgia: comportamento dos minerais durante a lixiviação e as características dos resíduos da lixívia;
- Pirometalurgia: determinar a pureza e qualidade dos metais e as características de outros produtos de fundição e escórias;
- Refino Eletrolítico: realizado para aumentar a pureza dos produtos gerados pela fundição. As técnicas de mineralogia aplicada determinam as características dos resíduos e impurezas nos ânodos.

A partir de ensaios para compreensão da assembleia mineralógica, quantificação dos elementos mineral-minério, texturas e grau de liberação das partículas entre outros, a mineralogia de processo estuda as relações entre minerais de minério e ganga e o vínculo entre as características desse minério com a recuperação metálica de determinado elemento. (PETRUK, 2000; SGS Mineral Service; PHILANDER & ROZENDAAL, 2013; NEUMANN *et al.*, 2004). A caracterização de minerais e materiais e a interpretação desses dados são realizadas pelas mais diversas técnicas e equipamentos, nesse tópico, serão discutidas as características das etapas da Caracterização Mineralógica e alguns dos principais métodos utilizados em cada uma delas.

Os resultados das análises da Mineralogia Aplicada proporcionam o entendimento do comportamento dos minerais durante o processamento, assim como dados que forneçam condições para percepção de características que influenciem a moabilidade, recuperação metalúrgica dos minérios, e a qualidade de algumas etapas do Processamento, e.g. Flotação. De acordo com BAUM, 2004; PETRUK, 2000 & NEUMANN et al., 2004 algumas destas características são:

- Presença de minerais benéficos ao processo (por exemplo, carbonatos que consomem ácido);
- Presença de minerais deletérios (por exemplo, minerais de Fósforo em minério de Ferro);
- Associações texturais de mineral-minério e ganga;
- Distribuição do tamanho das partículas e grãos dos minerais alvo;
- Identidade de minerais majoritários e minerais “traços”;
- Grau de Liberação dos minerais.

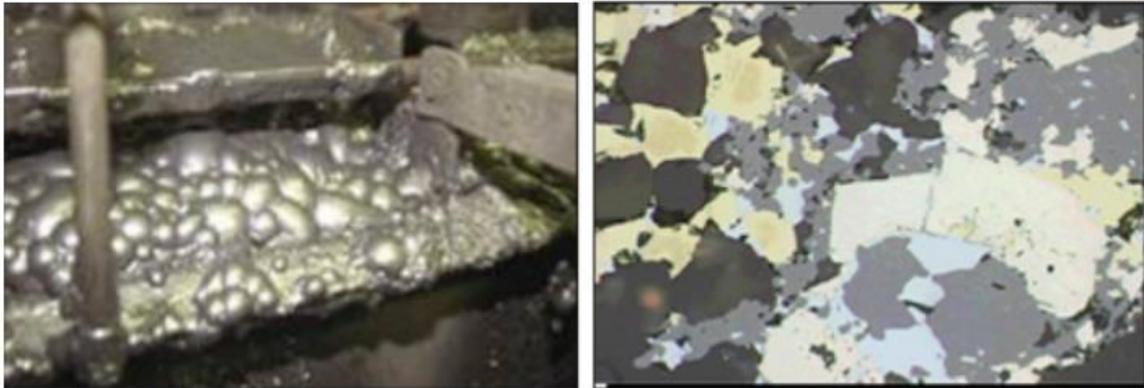


Figura 2.3: A qualidade da flotação é função do tamanho dos grãos e textura. Minérios com inter cruzamentos de grãos grossos e finos de pirita, calcopirita e esfalerita, por exemplo, limitam uma boa flotação.
Fonte: SGS MINERALS SERVICES (2013)

2.3.1 Preparação e Fracionamento das Amostras

Conforme apresentado em CHEMALE & TAKEHARA (2013), o procedimento para obtenção de amostras voltados à ensaios geometalúrgicos inicia-se com a delimitação do corpo geológico que será estudado, lembrando que em um mesmo depósito podem haver tipologias diferentes de minério, sendo assim, é comum que se obtenha uma quantidade grande de amostras, que ainda assim, serão limitadas em fidelizar a real diversidade textural e estrutural do corpo.

A preparação dessas amostras obtidas inicia-se com uma britagem e moagem a um tamanho de partícula máximo, normalmente denominado top size. O fracionamento da amostra facilita a identificação dos minerais, reduz o erro de sua quantificação e fornece informações a respeito de suas propriedades físicas, sendo assim, possui aplicação direta no desenvolvimento da rota de processamento. Esse fracionamento é feito de forma a evitar a produção de finos.

Após cominuídas, as amostras são homogeneizadas e quarteadas para obtenção das alíquotas referentes aos diferentes ensaios/análises. As alíquotas destinadas a fracionamento, identificação mineralógica e sua quantificação são classificadas em peneiras cujas malhas são definidas baseando-se em uma relação de equilíbrio entre precisão da informação e a utilização de recursos (tempo/gastos). A classificação obedece à série Tyler completa ou parcialmente, depois de peneiradas, as amostras são secas e pesadas (GRASSO, 2015; NEUMANN *et al.*, 2004).

A finalidade dos ensaios que serão praticados com essas alíquotas interfere nos próximos passos de preparação das mesmas. Sabe-se que ensaios metalúrgicos e análise geológicas serão desenvolvidas a partir dessas amostras:

1) Amostragem para Finalidade Geológica: se inicia com a localização em mapas geológicos das coordenadas exatas dos pontos em que as amostras serão retiradas, as orientações das estruturas dos corpos de minério devem ser devidamente registradas (acamamento, lineação mineral, foliação, etc.), correlacionando esses dados com a estruturação regional dos corpos. As amostras devem ser representativas das diferentes tipologias rochosas, e variações de estrutura e profundidade.

As técnicas utilizadas para preparação das amostras a partir desse ponto variam muito, principalmente em relação à quais equipamentos serão utilizados para análise, porém, de forma geral, são confeccionadas:

- a) Lâminas delgadas: Rocha colada com adesivo epóxi sobre lâminas de vidro;
- b) Seções polidas: Semelhante às lâminas, porém a superfície recebe um polimento singular, de forma que se obtenha uma amostra notoriamente plana e lisa.
- c) Material pulverizado: Alguns equipamentos como o Difratorômetro de Raios-X (XRD) e o Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X necessitam que a amostra se encontre pulverizada, em fração que varia de 80# - 40#.

2) Amostragem para Finalidade Metalúrgica: Ocorre a separação das amostras nas granulometrias inerentes a cada etapa do Beneficiamento, havendo peneiramento e confecção de seções para cada fração granulométrica desejada. Avalia-se parâmetros de mineralogia, texturas, microestruturas, superfície de contorno, entre outros, que auxiliam no estudo do comportamento do minério, que conseqüentemente fornece informações valiosas para a Planta de Beneficiamento (CHEMALE & TAKEHARA, 2013).

2.3.2 Identificação dos Minerais e Associações

A importância de se identificar todos os minerais, deve-se ao fato da incerteza sobre qual afetará diretamente o processo. Os minerais traços não podem ter influência na recuperação dos elementos e futuramente, sob a pureza das ligas metálicas constituídas do minério, e.g. o elemento Fósforo é altamente prejudicial em ligas metálicas ferrosas. Alguns minerais podem conter inclusive elementos danosos para o local de trabalho e para o meio ambiente durante o processamento (As e Hg).

Os minerais de valor econômico e os minerais de ganga, obviamente, precisam ser identificados para orientar os engenheiros na formulação da planta de beneficiamento, sabe-se que mesmo em minerais enriquecidos por um mesmo elemento de valor, como Zn ou Fe, variações das propriedades físicas e mineralógicas tornam o beneficiamento e o método de extração dos mesmos muito diversificado, inferindo então que a identificação dos minerais ou fases metálicas é crítica para a Geometalurgia. (CRAIG & VAUGHAN, 1994; PETRUK, 2000).

A identificação dos minerais é baseada nas propriedades que os definem como minerais: características de ordem química, estrutural (arranjo das partículas, clivagens etc.) e física (densidade, susceptibilidade magnética etc.). Para a caracterização, normalmente se trabalha em escala microscópica, aliado às observações em escala mesoscópica. As técnicas que serão descritas a seguir; são aplicadas na identificação de minerais em minérios não-tratados e em produtos dos vários estágios de cominuição e separação mineral; e incluem: (NEUMANN et al., 2004)

1) Microscopia Ótica: As seções polidas de amostras são examinadas com uso de luz polarizada refletida (minerais opacos) /transmitida (minerais transparentes), esses métodos tradicionais baseados na interação da luz com os minerais são flexíveis, e permitem identificar os minerais e suas texturas, as formas das partículas e até mesmo as proporções minerais (contagem de pontos. (PETRUK, 2000; NEUMANN *et al.*, 2004). Qualitativamente, as principais análises são direcionadas à coloração, a reflectância, o pleocroísmo, o anisotropismo e as clivagens dos minerais. Quantitativamente falando, tem-se a medição da reflectância (para identificação de minerais opacos) e a medição da micro-dureza. (CRAIG & VAUGHAN, 1994)

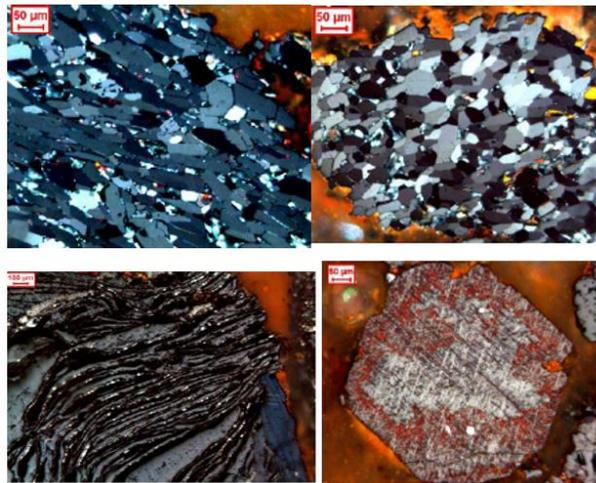


Figura 2.4: Fotomicrografias compostas por Cristais de Hematita Lamelar, Granular, Especular e Martita, respectivamente. Análise por Microscopia Óptica de Luz Refletida. Fonte: Arquivo Vale S/A. (FERREIRA, 2013)

2) Microscopia Eletrônica: Microscópio Eletrônico de Varredura/Scanning Electron Microscopy (MEV/SEM), assessorado pelos dispositivos de Microsonda Eletrônica (EPMA) e Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX/EDS). Para identificação de elementos traços (<200 ppm), também se utiliza atualmente o PIXE – Emissão de Raios-X por Indução de Prótons, e o SIMS/LIMS - Espectrômetros de Massa.

MEV: O microscópio eletrônico de varredura, fornece a partir de fotomicrografias, as relações de tamanho dos e a distribuição dos elementos ali presentes. Por um processo de irradiação da amostra, elétrons retroespalhados (backscattered electrons - BSE) são detectados, originando imagens composicionais em cinza, em que o tom de cinza é proporcional ao nº de elétrons irradiados de cada mineral. (CRAIG & VAUGHAN, 1994; NEUMANN et al., 2004).

Posteriormente, as fotomicrografias geradas em MEV são processadas por ferramentas de mineralogia automatizada, que incluem o QEMSCAN® e o MLA. Além de uma análise muito mais precisa de tamanhos de grãos e associações minerais em relação às técnicas ópticas, essas ferramentas, assessoradas por aplicativos de software integrados colorem "artificialmente" as imagens de tons acinzentados, trazendo muito mais clareza aos mineralogistas. (LAYTON-MATTHEWS *et al.*, 2013). O QEMSCAN®, inclusive, possui uma gama de modos de operação, como a varredura de imagens de campo, análise de minerais em massa, e a busca de vestígios

minerais (TMS). No processo automatizado de identificação mineral, cada pixel de imagem é analisado e comparado com um banco de dados de Composição Mineral, o SIP (SIP - Species Identification Protocol), que é a base para a obtenção de uma identificação precisa e completa (LUND, 2013).

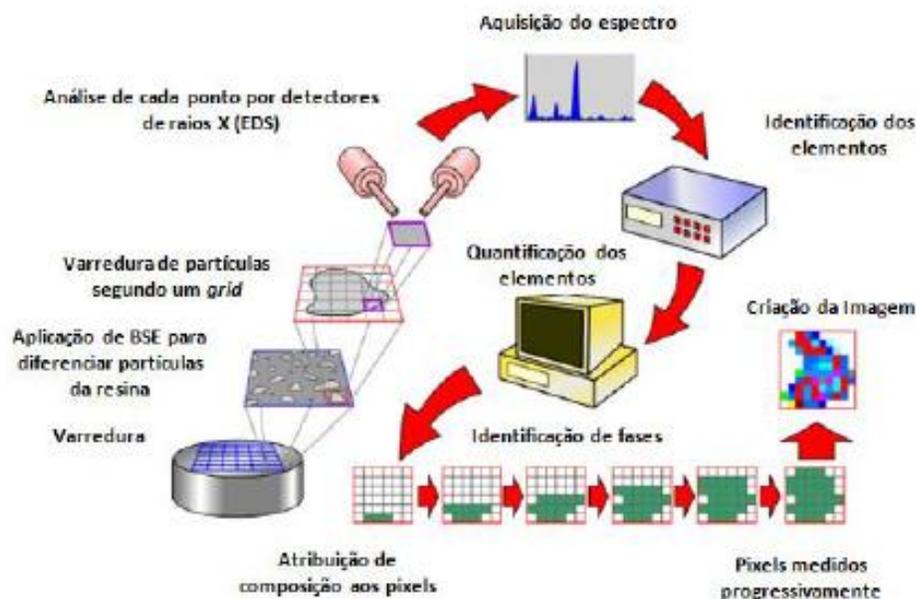


Figura 2.5: Sequência de etapas da análise via QEMSCAN®, para Identificação de Minerais e Quantificação de Elementos
 Fonte: Adaptado de (JAIME et al., 2009).

3) Difração de Raios-X (XRD – X-Ray Diffraction): Todo mineral possui um padrão único de difração de raios-X (XRD) que depende da estrutura dos cristais e da sua composição. Os padrões obtidos pela difração de raios-X são usados para identificar os minerais e determinar também as quantidades de cada um deles. A amostra montada é colocada no caminho do raio-X, e o sinal gerado pela difração do raio incidente no mineral é coletado por um detector (e.g. cintilômetro). Os minerais e fases presentes na amostra são identificados automaticamente a partir de softwares que interpretam esses espectros de difração coletados (PETRUK, 2000).

2.3.3 Composição Modal/Quantificação

O conhecimento quantitativo dos minerais ou fases nos produtos é essencial para a maioria das aplicações. No processamento de minerais, por exemplo, a informação sobre as quantidades de minerais procurados fornece uma predição da viabilidade econômica do minério e as informações das composições modais de ganga e outros minerais indesejáveis possibilitam projetar um fluxograma para uma disposição de rejeitos eficiente e a fomentação da barragem de rejeitos. São calculadas nesta etapa, as proporções de minerais (ou teores, no jargão da mineração) de cada mineral presente na amostra analisada. Segundo (NEUMANN et al., 2004), os procedimentos de quantificação mais comumente aplicados são:

- 1) Cálculos Estequiométricos a partir de análise química e da composição mineralógica da amostra;
- 2) Método de Rietveld (Espectro de Difração de Raios-X): consiste no refinamento em um difratograma digital, obtido a partir do espectro de difração dos raios-X incidentes na amostra. Uma grande vantagem do método Rietveld em relação aos outros principais métodos quantitativos é a possibilidade de determinar a quantidade de material amorfo da associação mineral;
- 3) Análises Térmicas: Divididas em termodiferenciais (ATD) e termogravimétricas (ATG). Muito utilizadas quando uma ou mais fases minerais perdem/ganham massa com aumento da temperatura. As amostras são aquecidas em fornos de precisão, com monitoramento em tempo real das mudanças de temperatura.
- 4) Análise de Imagens;

Nas últimas décadas as técnicas mais usuais de cálculo das proporções minerais foram baseadas em procedimentos consideravelmente arcaicos de “Contagem” por Microscopia Óptica, um trabalho enfadonho, dispendioso e que possui relação direta com o nível de habilidade do Mineralogista que realiza a contagem. (Milhares de pontos necessários para obter um valor minimamente significativo). Com o avanço recente das tecnologias nesse campo da Mineralogia, a Análise Digital de Imagem passou a ser a mais utilizada, todos os pixels de uma imagem são considerados, o que se traduz em uma análise muito mais precisa e rápida, desde que as imagens

permitam separar as fases. Assim como abordado na seção “Identificação dos Minerais”, as técnicas mais sofisticadas envolvem uma automatização dos processos, as principais são relacionadas aos Microscópios Eletrônicos de Varredura; se destacando: QEMSCAN, MLA – técnicas analíticas integradas ao MEV (SUTHERLAND, 2003; LUND, 2013; PETRUK, 2000; NEUMANN et al., 2004).

2.3.4 Texturas e Liberação

A interpretação das texturas minerais e da análise de liberação dos grãos findam as principais análises mineralógicas presentes na confecção dos modelos geológicos. Tais interpretações, estão intimamente ligadas à Cominuição, a primeira etapa no beneficiamento de minérios para liberar as partículas de minerais valiosos da ganga, para tal, o conhecimento dos tamanhos e intercrescimento dos grãos minerais, que advém da verificação das texturas minerais, é imprescindível. Somente através da análise textural minuciosa das amostras de minério é possível obter o considerado tamanho ótimo do grão para uma liberação efetiva.

A britagem/moagem insuficiente pode resultar em perda de minerais valiosos descartados como rejeito. E uma fragmentação superdimensionada desperdiça energia e produz finos muito prejudiciais ao longo do Beneficiamento.

À medida que consideramos os problemas de liberação dos grãos do minério, é útil delinear uma classificação baseada na geometria dos intercrescimentos e intertravamentos dos grãos/partículas das texturas. A imagem a seguir, retrata algumas das principais geometrias texturais de forma simplificada (CRAIG & VAUGHAN, 1994).

TEXTURA	DIAGRAMA	Liberação/Ex. Minérios	TEXTURA	DIAGRAMA	Liberação/Ex. Minérios
Intertravamento simples, equigranularidade, margens retilíneas		Liberação razoável, ocorrência em depósitos ortomagmáticos, alto grau de metamorfismo e recristalização do minério.	Textura disseminada, fases finamente dispersas.		Liberação completa quase impossível, ocorrência por exsolução, Au e Arsenopirita, substituem Pirita/Esfalerita
Intertravamento simples, interpenetração negligenciável, margem curvilínea		Liberação razoável, ocorrência em depósitos de recristalização simultânea do minério.	Intertravamento tipo "atol", arcos intergranulares, envelopamento de partículas		Liberação difícil, mas possível, ex ocorrência: filme de hematita revestindo Au, e Calcocita na Pirita
Intertravamento médio, aspecto "manchado"		Liberação razoável, ocorrência em zonas de metassomatismo ativo (substituição partículas)	Camadas concêntricas, intertravamento tipo "teia"		Liberação razoável/difícil, ocorrência em depósitos de Fe, Mn e Al
Quase ausência de intertravamento, textura do tipo "Myrmekitic".		Liberação quase impossível, ocorrência incomum, processos de metassomatismo e exsolução.	Planar/Lamelar, intertravamento tipo "sandwich"		Liberação razoável/fácil, exemplos de ocorrência ilmenita/magnetita, hematita/magnetita
			Reticular, intertravamento do tipo "rede"		Liberação razoável, ocorrência em associações minerais como bornita/calcopirita, hematita/ilmenita/magnetita

Figura 2.6: Classificação Geométrica e Características de Liberação de Texturas Mineraias.
 Fonte: Adaptado de (CRAIG & VAUGHAN, 1994).

A Textura é um parâmetro de difícil incorporação ao Modelo Geometalúrgico. Do ponto de vista do Processamento, (LUND, 2013) diz que: "Duas amostras são texturalmente diferentes, se a distribuição de liberação por granulometria, for diferente depois de cominuição ocorrida em condições semelhantes". Geologicamente, define-se textura mineral, como inter-relação espacial entre grãos minerais em uma rocha. Por ser uma grandeza tão qualitativa, isto pode levar a um grande número de domínios em se tratando de Geometalurgia, conseqüentemente, uma infinidade de amostras para análise. Além disso, ao contrário dos teores minerais, as variáveis texturais não são necessariamente aditivas e, portanto, a análise textural requer uma ponderação geoestatística cuidadosa quando aplicada na Geometalurgia. Uma vez que o tratamento de dados não numéricos na modelagem de blocos é um desafio, a descrição das texturas minerais descritivas deve ter sua natureza alterada de qualitativa para quantitativa.

Estudos preliminares foram desenvolvidos no trabalho de (LUND *et al.*, 2015) abordando que a informação textural pudesse ser analisada em uma escala de partícula, e dessa forma seria aplicada em um contexto geometalúrgico. As etapas sequenciais realizadas para essa finalidade foram:

cominuição e distribuição granulométrica das partículas finamente pulverizadas e análise de liberação (extrapolação para partículas muito finas). É importante ressaltar, que, raramente uma única textura fornece evidências inequívocas em relação à origem ou história de um depósito de minério. Na prática, uma variedade grande de texturas será observada, e essas análises serão utilizadas em conjunto com as análises de liberação (CRAIG, JAMES & VAUGHAN, DAVID, 1994; LAMBERG, 2011)

Abordando a “Liberação Mineral”, sabe-se que o processo de concentração mineral, baseado em diferenças físicas, químicas e outras propriedades diferenciadoras (susceptibilidade e densidade) será mais eficiente caso as fases minerais sejam livres, pois desta forma as diferenças entre as mesmas são mais evidentes. Na maior parte das espécies minerais, essa liberação será forçada por processos de cominuição, salvo exceções de minerais densos explorados por processos de dragagem por exemplo. Usualmente, quanto maior o grau de cominuição da partícula, maior o "grau de liberação", porém esse processo sempre é controlado, devido aos custos elevados e a tentativa de evitar produção de finos, tão prejudiciais ao longo do processo por serem menos sensíveis aos processos de concentração mineral (FERREIRA, 2013).

Segundo NEUMANN *et al.* (2004), ao se observar a liberação mineral deve-se estudar três fundamentos: medição do grau de liberação, previsão de liberação e simulação.

O grau de liberação, embasado na espécie mineral de valor (exceto Flotação Reversa), nada mais é do que a distribuição de composições percentuais de partículas para diferentes faixas granulométricas. Na maioria dos minérios, várias fases estarão presentes, e pelo menos uma fase terá valor econômico e uma outra fase constituirá a ganga. Partículas com uma única fase são chamadas partículas liberadas. Todas as outras partículas serão consideradas mistas. Para elaboração do grau de liberação geralmente são consideradas as classes de teor: 0%, 0-10%, 10-20%, 20-30%, 30-40%, 40-50%, 50-60%, 60-70%, 70-80%, 80-90%, 90-100%, 100%. Sendo, as classes 0% e 100%, livres das duas ou mais fases minerais consideradas, e as classes intermediárias, constituídas de partículas mistas com diferentes proporções entre os minerais.

Destaca-se que, quantitativamente, o comportamento da partícula mista ao longo do processo, será uma congregação do comportamento das fases mono-minerálicas, variando conforme a proporção de cada um deles na partícula. Já de forma qualitativa, esse comportamento é dependente da textura ou arranjo dos cristais na rocha, além de tamanho e forma. Em processos de flotação, por exemplo, quando uma fase mineral envolve a outra, deve-se observar a porção de superfície exposta da espécie, e não sua composição relativa na partícula. Os principais tipos de associações entre as fases minerais em uma partícula mista são mostrados na figura 2.8: (GAUDIN, 1939; FERREIRA, 2013).

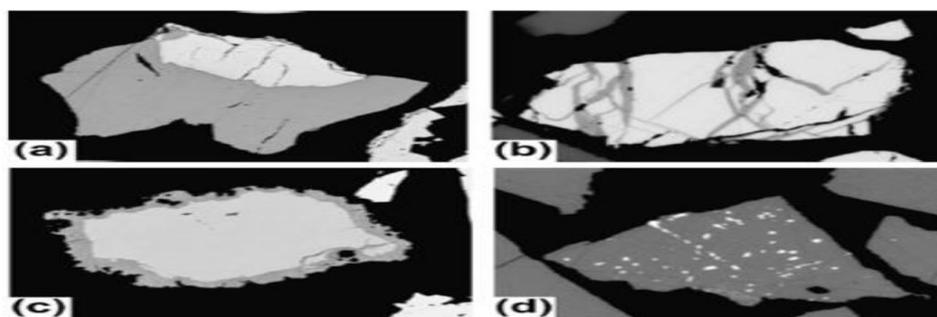


Figura 2.7: Fotomicrografias apresentando os quatro tipos de partículas mistas descritas por Gaudin sendo (a) espécies justapostas, (b) veios, (c) recobrimento e (d) inclusões.
Fonte: BARNUEVO (2014).

As principais técnicas para obtenção do grau de liberação são: Método de Gaudin, Separação em Meio Denso, Separação em Suspensões Coloidais Ferromagnéticas e Análise de Imagens (especialmente MEV/SEM).

A previsão de liberação calcula o grau de liberação e o comportamento de um minério antes mesmo que ensaios de moagem e concentração possam executados, a partir de amostras de testemunhos de sondagem. Futuramente, com o modelo geometalúrgico definido, essa previsão permitirá que o desempenho final do concentrado possa ser planejado ainda na fase de definição de blocos a serem lavrados. A previsão da liberação, tal qual a obtenção do grau de liberação e a simulação, está intimamente ligada à textura do minério. Dados de textura corretamente avaliados podem ser usados inclusive na etapa de krigagem, e com a ajuda de simuladores, recuperações realistas podem ser calculadas em função do teor de corte para a lavra (NEUMANN *et al.*, 2004).

A Simulação da liberação é utilizada quando algum processo está associado à cominuição, e.g. concentração ou classificação, que dividem o fluxo de partículas em dois ou mais outros fluxos, neste caso, essa nova carga circulante apresenta características diferentes do padrão inicial. Deve-se basear então em técnicas de balanço populacional implementado juntamente com modelos de moagem e britagem. A previsão não seria indicada para esses casos, já que o processo de liberação em circuitos de moagem fechados, acarreta em uma transformação das texturas, e as partículas recirculadas não possuem mais as características originais do minério não-cominuído. O modelo de balanço populacional permite que este cálculo seja feito independentemente das características do minério não-cominuído, e o processo de liberação será caracterizado então em termos das características do processo de moagem em si.

O resultado desta análise de simulação é chamado de diagrama de Andrews-Mika e é apresentado em (NEUMANN *et al.*, 2004) com maiores detalhes.

3 O MODELO DE PROCESSAMENTO MINERAL

O processamento de minerais, conforme definido por WILLS (2016), é o processo que, após a mineração, libera e concentra os minerais de valor. Esta definição, em oposição ao beneficiamento de minérios, indica explicitamente minerais com base em seu valor agregado. A recuperação de minerais-minério da ganga/ rocha matriz hospedeira consiste em quatro operações principais:

- 1) Manipulação: transporte do minério da mina para a planta, bombeamento de polpa (contendo água e minério, às vezes reagentes);
- 2) Cominuição: modelos para redução do tamanho do material e liberação dos minerais de valor. Durante esta etapa, ocorre a fragmentação das partículas em tamanhos menores;
- 3) Classificação: ocorre por distribuição de tamanho de partículas do material. Seleção de tamanhos em que os minerais estejam adequadamente liberados;
- 4) Concentração: as partículas são separadas por propriedades físicas e.g. densidade específica, susceptibilidade magnética, hidrofobicidade, reatividade química ou formato das partículas (KOCH, 2017).

O modelo de processo recebe as informações do modelo geológico e as transforma em respostas acerca do desempenho metalúrgico. Ao desenvolver um modelo de processo (ou metalúrgico), é necessário responder às seguintes perguntas: 1). Qual é o propósito do modelo? 2). Qual é o nível da complexidade de descrição do minério? 3). Quão detalhada é a informação que o modelo pode fornecer em uma performance metalúrgica?

Em um contexto geometalúrgico, o objetivo do modelo é retornar parâmetros metalúrgicos importantes para inclusão no modelo de blocos, pautados também no uso de ferramentas geoestatísticas. Uma série de testes, tabela 3.1, são realizados para análise das variáveis metalúrgicas presentes nos processos da planta de beneficiamento, que normalmente incluem: taxa de alimentação da usina, qualidade do concentrado (em determinada etapa, e.g. rougher ou cleaner), teores e recuperação metálica dos elementos de valor econômico; consumo de energia, água de

processo e reagentes; características dos minerais que constituem os rejeitos. Um modelo de processo significativo deve ser capaz de otimizar ou fornecer previsões da planta de beneficiamento, além de acomodar variabilidades desses processos para cada bloco inserido no modelo geometalúrgico (LUND, 2013; KOCH, 2017).

Tabela 3.1: Classificação dos Testes para diversas etapas constituintes do Modelo de Processo.

Etapa	Teste Geometalúrgico	Teste de Variabilidade	Teste de Laboratório
Cominuição	GCT(MWANGA, 2016)	SPI (Índice Moagem SAG), Analisador de Frag. Rotativa JK (JKRBT), Teste de Drop Weight JK (JKDWT)	Ensaio WI de Bond
Separação Gravítica	-	Separação Densitária (DMS)	DMS, Jigues, Mesa Vibratória, Espiral de Humphreys
Flotação	Medição de ângulos de contato, Índice de Seletividade JK (JKMSI)	MinnovEX(FLEET), Índice de Flotabilidade JK (JKFIT)	Ensaio tradicionais de flotação em bancada
Separação Magnética	Tubo de Davis	LIMS - Separador Magnético Baixa Intensidade, Dry LIMS (Mortsell) - LIMS à seco	Separador Magnético em pequena escala

Fonte: Adaptado de (KOCH, 2017).

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

Modelo de Cominuição: Modelos de fragmentação onde a distribuição de tamanho da partícula muda.

Modelos de Concentração: Modelos de separação onde as partículas são distribuídas entre dois ou mais fluxos de saída com base em suas propriedades físicas.

Modelos de Lixiviação e Precipitação: Modelos onde a fase líquida é uma componente ativa, os minerais se dissolvem e novas fases são formadas através de reações químicas. (Não serão abordados em um primeiro momento) (LAMBERG, 2011; LAMBERG et al., 2013; LUND & LAMBERG, 2014)

3.1 O MODELO DE COMINUIÇÃO

Um modelo geomet. deve ser capaz de prever o comportamento do minério na fragmentação. Os circuitos de fragmentação industrial são comumente operados para produzir partículas com distribuição de tamanho fixo, por exemplo com tamanho P80 entre as etapas. Dessa forma pode-se aferir que a cominuição do minério, controla o volume de produção.

Os minérios devem ser triturados em partículas, para que ocorra a devida liberação quando na fase de concentração dos minerais. A fragmentação adequada, além de definir a recuperação metálica dos elementos, também é a etapa de maior gasto energético na planta de beneficiamento, e muitas vezes é o principal limitante da capacidade de uma usina. Portanto, informações acerca da distribuição granulométrica do material, a liberação mineral alcançada (auxiliada por análise textural) e a energia dispendida no processo, são fatores imprescindíveis no controle das plantas de processamento mineral (MWANGA, 2016; PERTTI LAMBERG et al., 2013).

Além da sua própria importância na geometurgia, o modelo de cominuição, principalmente o circuito de moagem é altamente influente nos resultados da flotação, uma liberação inadequada é uma causa comum de desempenho fraco nos processos de concentração. À medida que as tecnologias de moagem se tornam cada vez mais disponíveis, é possível otimizar a liberação e melhorar o desempenho da flotação, onde a textura mineralógica é um fator limitante (BRADSHAW, 2014)

Os circuitos de cominuição, como já abordado são muitas vezes o gargalo em uma planta de processamento de minerais. A Figura 3.1 representa um circuito típico de cominuição simplificado consistindo da unidade de britagem, que alimenta um circuito de moagem fechado que segue para classificação granulométrica em hidrociclones.

O objetivo da etapa de cominuição é gerar um certo tamanho de partícula que otimize a produção e o comportamento na flotação. Para isso, deve-se ter controle absoluto do material da alimentação e são necessárias amostras de minério representativas. Reforçando o que já foi abordado nesse texto, diferentes testes serão considerados para o Modelo de Cominuição, com objetivo de (I) desenvolver o fluxograma da planta; (II) dimensionar as unidades operacionais, (III) validar o

desempenho metalúrgico e (IV) analisar variabilidades. Para fins geometalúrgicos, o resultado desses trabalhos experimentais deve servir de insumo para a modelagem do processo, ou seja, os resultados dos testes de cominuição serão vinculados aos parâmetros metalúrgicos utilizados nos modelos de processo de cominuição.

Para descobrir as variações relacionadas ao minério quanto ao seu comportamento na cominuição e também outras propriedades de processamento mineral, é comum executar um maior número de testes de variabilidade, também descritos como testes geometalúrgicos. Neste sentido, uma série de amostras de minério é coletada e caracterizada em relação à sua composição química, mineralogia, bem como propriedades de fragmentação e propriedades de processamento relacionadas à separação. (MWANGA, 2016)

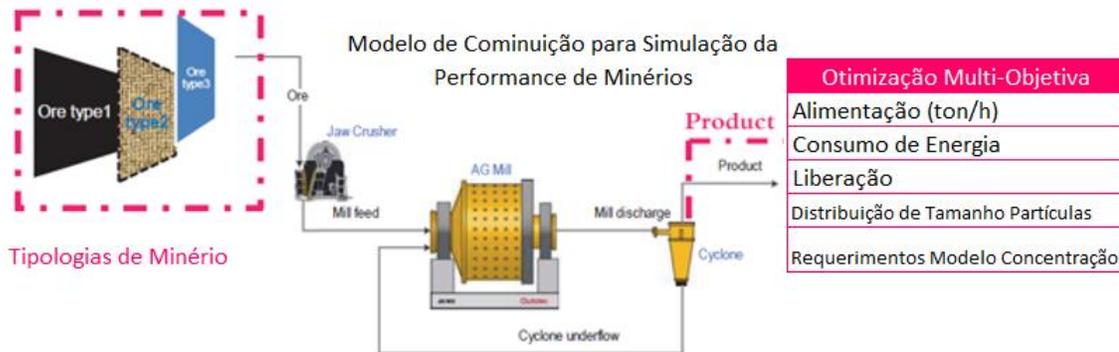


Figura 3.1: Fluxograma Simplificado de um Circuito de Cominuição Típico Simulado.
 Fonte: Adaptado de (MWANGA, 2016).

A energia gasta para reduzir o tamanho do material em partículas, é o foco dos testes laboratoriais na Cominuição, de forma a otimizar os circuitos. Alguns dos principais parâmetros analisados são:

- 1) Os parâmetros de mecânica das rochas (UCS - Força de Compressão, Módulo de Young e Coeficiente de Poisson) e microfaturas influenciam sobre o comportamento do minério durante a sua fragmentação.
- 2) O Drop Weight Test (DWT) que mede a resistência do minério se quebrar sob forças de impacto controladas pela quantidade de energia despendida e;

- 1) O Índice WI de Bond (BWi) é definido como o parâmetro de cominuição que expressa a resistência de um material à britagem e moagem. Numericamente é dado como o "quilowatt-hora por tonelada (KWh/t)" necessário para reduzir o tamanho do material da alimentação em um passante de 80% < 100 μm. Na prática, O WI é determinado a partir de dados provenientes da planta ou realizando testes de moagem de laboratório em que os P80 e F80(A80) são medidos. A expressão para cálculo do WI de Bond é dada a seguir: (LOPERA, 2014)

$$BWi = \frac{49.1}{P^{0.23} Gbp^{0.82} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)}$$

Sendo,

BWi = Work Index (kWh/t);

P = Encapsulamento (μm);

Gbp = Gramas por revolução em média nos últimos três ciclos (μm);

P80 = Tamanho com 80% de passante (produtos) (μm);

F80 = Tamanho com 80% de passante (alimentação) (μm)

No que tange à Geometalurgia, existem algumas desvantagens em relação aos principais métodos de cominuição atualmente praticados, seja em escala de bancada ou piloto. No teste de WI de Bond, por exemplo, uma clara desvantagem reside no tempo gasto para a realização do ensaio e a necessidade de um número relativamente alto de amostras. Considerando diferentes parâmetros, como tamanhos de partículas e propriedades mecânicas das rochas de minério, pode-se afirmar que é praticamente impossível a prática de um método infalível para determinar o comportamento de cominuição do minério em um contexto geometalúrgico. A matriz a seguir, figura 3.2, mostra os testes mais comuns existentes hoje. Os métodos de cominuição voltados à geometalurgia devem evoluir com foco em otimizar métodos existentes, como o de Bond, minimizando a quantidade de amostra necessária, ou ainda a criação de testes com novos conceitos. Como a eficiência do Modelo de Processo em contexto geometalúrgico reside no quão bem os parâmetros de variabilidade são representados, é fácil deduzir que existe uma maior valia em se obter muitos dados de testes de pequena escala do que um pequeno número de investigações detalhadas e dispendiosas (MWANGA, 2016).

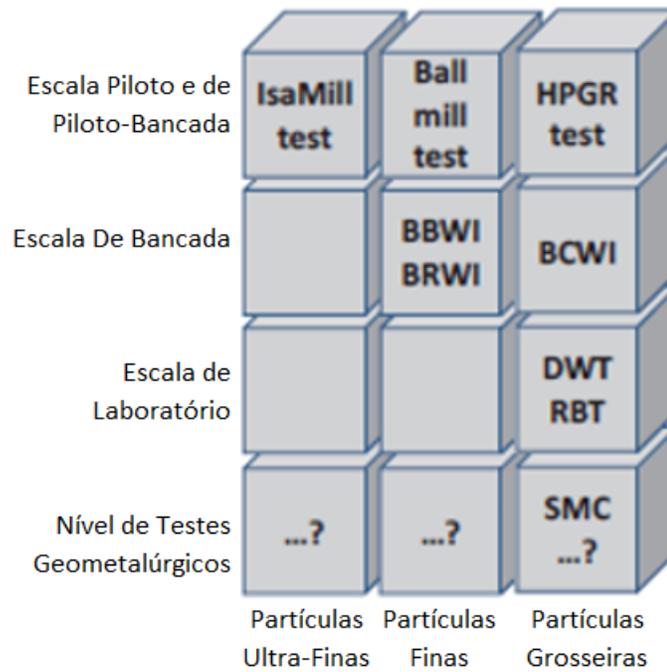


Figura 3.2: Métodos de testes para obtenção de dados ligados à etapa de cominuição na Geometalurgia, a matriz se divide em níveis de profundidade de escala e o tamanho de partícula em que se trabalha.
 Fonte: Adaptado de (MWANGA, 2016).

3.2 O MODELO DE CONCENTRAÇÃO/SEPARAÇÃO

Com a diminuição dos teores minerais, as exigências de produção, a necessidade de se operar com custos menores de forma eficiente e ainda as questões de cunho ambiental, existe uma forte demanda pela combinação de métodos de concentração, com conhecimento profundo dos minerais envolvidos no processo, como explanado na seção "Modelo Geológico" e a busca por melhorias nas tecnologias existentes. Uma abordagem detalhada das características de concentração dos minérios envolvidos associado a um controle de variáveis pelo Modelo Geometalúrgico, permitem reduzir de forma significativa à variabilidade dos parâmetros de qualidade dos concentrados.

Os minerais de valor são separados dos de ganga com o uso de métodos de concentração condicionados a uma ou mais propriedades diferenciadoras entre os minerais, por exemplo: Densidade, Susceptibilidade Magnética, Textura/Friabilidade, Reatividade Química e Reatividade de Superfície (Flotação). A Tabela 3.2 demonstrada em ARROYO ORTIZ (2014), relaciona alguns dos principais tipos de métodos de concentração associados ao processo diferenciador em que foram baseados e alguns dos principais equipamentos utilizados para cada um deles.

Tabela 3.2: Principais Processos de Concentração e os equipamentos utilizados.

Processos de Concentração	Classes/Tipos	Onde (exemplos)	Exemplos de Equipamentos
Gravíticos	Meio Denso (Fe-Si)	África do Sul	Tambor, DWP, LACODERMS
	Jigagem	Brasil, EUA, Austrália.	Remer-WEMCO, Pneumático KHD
	Concentração em Espirais	Canadá, Brasil, Mauritània, Austrália.	Espirais AKAFLEX, CARPCO, ME etc, praticamente todas com água de lavagem.
	Hidrosseparadores	Canadá, Brasil (piloto)	Classificadores do tipo FLOATEX
	Outros	Brasil (desativado)	Cone Reichert, Mesa concentradora ar
Magnéticos	Baixa Intensidade	EUA, Suécia, Peru, Chile, México, Ucrânia, Rússia, China.	Separadores de tambor
	Média Intensidade	Brasil	Separador de tambor de terras raras
	Alta Intensidade e/ou Alto Gradiente, com matrizes.	Brasil, Canadá, México, Índia, Austrália, China.	Separador tipo Jones (Carrossel), Separador tipo Ferrous Wheel, Separador tipo Slon.
Eletrostáticos	Separador de Placas	Chile	Placas
Físicoquímicos	Flotação Catiônica Reversa de Quartzo	Brasil, EUA, Canadá, Índia, Rússia (em implantação), Ucrânia (em implantação), Chile, Venezuela (piloto)	Colunas, células mecânicas convencionais, Células tipo Smart-Cell, Colunas com aeração externa
	Floculação Seletiva e Flotação Reversa	EUA	Células mecânicas convencionais
	Flotação Reversa de Fosfatos	Suécia, México, Irã	Colunas e células mecânicas convencionais
	Flotação direta	EUA, China	Células mecânicas convencionais
	Flotação Aniônica Reversa após ativação do quartzo	EUA	Células mecânicas convencionais

3.2.1 Modelo de Separação: Flotação na Geometalurgia

Em BULLED (2005), aborda-se que um circuito de Flotação não opera de forma isolada e que existe grande influência do minério que foi alimentado aos circuitos de Britagem/Moagem, e de que forma se deu essa etapa de Cominuição. Em outras palavras, um link se faz necessário entre as etapas de cominuição e as ferramentas de simulação do circuito de flotação.

Os depósitos de minério normalmente contêm tipologias diferentes, algumas delas contendo elementos ou minerais prejudiciais à flotação. Estes podem estar associados às fases minerais da ganga, tais como minerais de argila ou filossilicato. Por exemplo, as áreas supergênicas em um depósito de cobre de pórfiro normalmente contêm argilas que podem causar problemas tanto para a flotação como para a lixiviação, enquanto os minérios maficos, como aqueles no complexo Bushveld de Platina na África do Sul, contêm ganga que flota naturalmente na forma de ortopiroxênio ou talco.

Um outro exemplo abordado por BRADSHAW (2014), consiste em um depósito de Zinco da mina de Gamsberg na Namíbia, no qual a associação complexa de elementos deletérios como Manganês com a Esfalerita (minério) resulta em uma separação inadequada por flotação e o tratamento hidrometalúrgico se faz necessário para obtenção de um grau suficiente de recuperação metálica. No entanto, para um minério "inferior" na litologia, a associação de manganês se dá com silicatos (outra tipologia) e, portanto, o desbaste por flotação é mais facilmente obtido, demonstrando que a avaliação mineralógica é extremamente necessária para interpretar o comportamento do processamento, validando a importância do conhecimento geometalúrgico. Revisando brevemente o método, a Flotação é um processo de concentração baseado na reatividade de superfície entre minerais e reagentes que possibilita a separação físico-química dos minerais de valor da ganga. O sistema de uma célula de flotação é demonstrado pela figura 3.3:

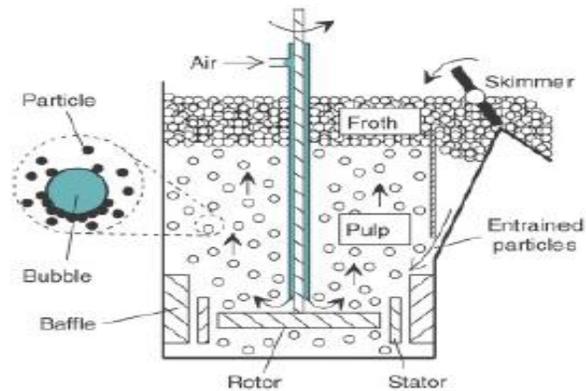


Figura 3.3: Esquema representativo para uma célula de flotação de espuma, e o contato bolha-partícula.
 Fonte: (NGUYEN & SCHULZE, 2003)

A principal propriedade diferenciadora na flotação é a hidrofobicidade das partículas, que é induzida na célula/tanque de flotação a partir do uso de diversos reagentes; os coletores (aumentam o contato partícula-bolha), os espumantes (aumento da estabilidade da espuma) e os modificadores (controle de pH, estado de agregação da polpa - coagulantes, floculantes e dispersantes). O processo consiste na formação de bolhas no fluido do tanque a partir de injeção de ar (e agitação mecânica), bolhas essas que serão responsáveis pelo carregamento de partículas minerais até a superfície a partir de diferenças densitárias. Esse carregamento é limitado pela força de adesão partícula-bolha, que por sua vez, depende do grau de liberação das partículas minerais. O conjunto carregado (hidrofóbico) será então retido e posteriormente separado, assim como o conjunto hidrofílico que se manteve em suspensão. A hidrofobicidade é que rege a maior afinidade de uma partícula para com a fase líquida ou gasosa (VIEIRA, 2016).

Devido à complexidade o processo é repetido algumas vezes, em etapas sucessivas envolvendo as células de flotação. Ao alimentar uma célula Rougher, o material é dividido em um concentrado pobre e um rejeito ainda “rico”, esse concentrado alimenta a célula Cleaner, e o rejeito alimenta uma célula Scavenger. O produto da etapa Cleaner será o concentrado final enriquecido do processo de flotação e um rejeito, que retorna a Rougher; quanto à célula Scavenger, tem-se a produção de um rejeito final pobre, e a recuperação de um concentrado com algum teor considerável que realimenta a Rougher. (CHAVES, 2006; VIEIRA, 2016). Uma representação para esse circuito é dada na figura 3.4:

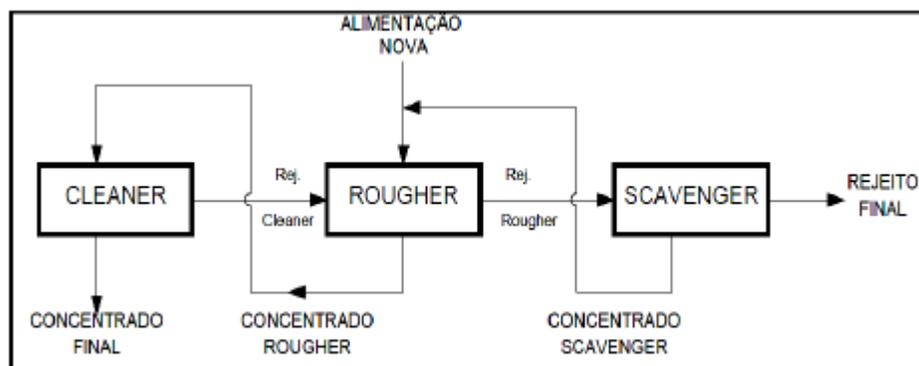


Figura 3.4: Circuito de Flotação.
Fonte: CHAVES (2006).

Com a determinação do fluxograma ideal de flotação para o dado minério, faz-se necessária a avaliação dos resultados obtidos, as principais técnicas de análise são: avaliação do teor do elemento de interesse no concentrado da Cleaner; Recuperação Mássica e Recuperação Metalúrgica. A seguir um exemplo de cálculo da variável metalúrgica “Recuperação Mássica”

Sendo: A = massa da alimentação; C = massa do concentrado; E = massa do rejeito; a = teor da espécie i em A; c = teor da espécie i em C; e = teor da espécie i em E. i – espécie de interesse. (VIEIRA, 2016; FERNANDES, 2013).

R = Recuperação Metalúrgica →
$$R = \frac{cC}{aA} \text{ ou } R = \frac{c(a - e)}{a(c - e)}$$

A confrontação dos resultados de testes laboratoriais obtidos com a escala industrial do processo é fundamental para formulação de novos anexos da planta de processamento, ou para a otimização das plantas já existentes. Frequentemente, as similaridades entre a escala de bancada e a escala industrial são estabelecidas por uma série de parâmetros adimensionais como, n° de Reynolds, taxa de energia consumida e taxa de fluxo.

Abordagens mais modernas giram em torno das propriedades de dispersão dos gases e distribuição do tamanho das partículas que alimentam a flotação, juntamente com parâmetros operacionais e de equipamentos como é objeto de estudo no trabalho de SUAZO et al. (2010). Nesse trabalho, que consiste em uma modelagem geometalúrgica do circuito de Flotação de Collahuasi (Mina de cobre no Chile - joint venture entre Xstrata e Anglo American), a metodologia usada foi promover uma série de ensaios de bancada de flotação para cada unidade geometalúrgica definida previamente.

As variáveis estudadas foram distribuição de tamanho das partículas (P80), agitação (rpm); taxa de fluxo de gás e Tamanho das bolhas. Foram testadas dez combinações diferentes dessas variáveis para cada UGM (Unidade Geometalúrgica) - o mesmo que Domínio Geometalúrgico - conceito que será introduzido posteriormente. Cada UGM corresponde a uma tipologia de minério diferente. De janeiro de 2008 a abril de 2009, foram efetuadas coletas semanais dos registros de produção, que incluíam os já mencionados P80 e as outras variáveis, além de: teor de Cobre da recuperação e distribuição granulométrica da alimentação da planta de Flotação.

As proporções de cada UGM alimentado para a planta eram conhecidas a partir do planejamento de operações mineiras (incluindo blendagem) para tal período. A recuperação do cobre para a blendagem de minérios das diferentes UGM's foi estimada individualmente e posteriormente combinadas em uma média ponderada usando a fração de massa correspondente a cada tipologia que integrava o blend da alimentação.

Como visto graficamente na figura 3.5, o modelo de flotação foi capaz de prever de maneira satisfatória as recuperações de cobre obtidas. O coeficiente de correlação (conceito abordado no Capítulo 4) obtido entre o modelo de flotação experimental e os resultados provenientes da planta, foi maior que 95% para as unidades geometalúrgicas estudadas.

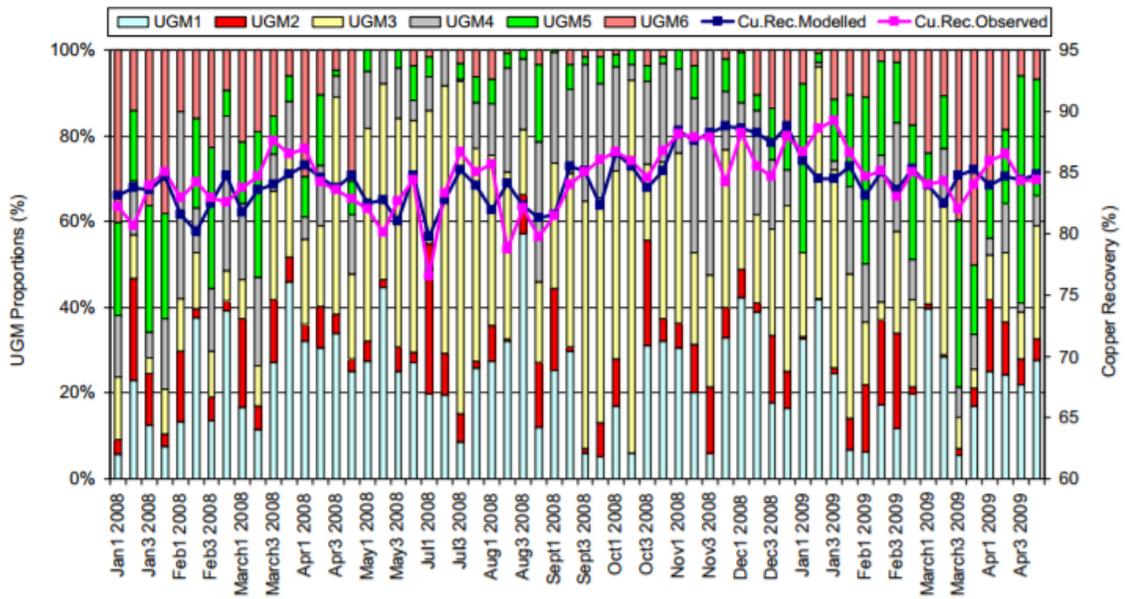


Figura 3.5: Comparativo entre as curvas de Recuperação de Cobre Modelada (Azul) e a Recuperação de Cobre Observada na prática (Rosa), para diferentes composições de UGM's no blend da alimentação do circuito.
 Fonte: SUAZO et al. (2010)

4 MODELAGEM GEOMETALÚRGICA

Segundo BULLED (2005); CARMO et al., (2015) & ARROYO ORTIZ (2014), a Modelagem Geometalúrgica, pode ser definida como uma abordagem que mede a variabilidade de um minério e quantifica o seu efeito na cominuição e resposta metalúrgica. Essa variabilidade para as diversas variáveis geometalúrgicas observadas, passa por métodos numéricos (e.g. Regressão Linear) análise geoestatística e variográfica para popular os blocos com os domínios geomet. A representação dessas informações distribuídas espacialmente origina um modelo, figura 4.1, que possibilita uma visão global e preditiva do minério nos processos de beneficiamento.

A distribuição espacial de parâmetros geológicos e respostas metalúrgicas atribuídos em blocos individuais gera o que se conhece como Modelo de Blocos. Cada bloco pode armazenar informações geológicas, composição química, geofísica, metalúrgica entre outras informações relevantes. Pacotes de software como Vulcan, Surpac, Leapfrog e Micromine são aplicados com objetivo de construir os modelos geometalúrgicos (LISHCHUK, 2016).

O mapeamento das variáveis para construção dos modelos pode ser feito por duas unidades geometalúrgicas espaciais: as classes e os domínios. As classes geometalúrgicas se dividem em categóricas (e.g. litologia, tipologia do minério) ou contínuas (e.g. teores, índices de WI). Para estabelecer domínios uma mistura dessas variáveis pode ser utilizada. Em depósitos de formação intrusiva, por exemplo, o grau, tipo e proximidade da alteração geológica, muitas vezes estão correlacionados com o conteúdo metálico e outras propriedades da rocha. Essas variáveis podem ser usadas para modelar os domínios geometalúrgicos, considerando tanto variáveis categóricas (tipo de alteração) quanto contínuas (grau da alteração). Para gerenciamento eficaz das diversas variáveis englobadas em uma modelagem geomet. muitas vezes são feitos agrupamentos (mesclagem de variáveis em uma única variável) ou eliminação de variáveis (variáveis de muito baixa/muito alta correlação e de amostragem esparsa).

Definidos os domínios geometalúrgicos a partir dos bancos de dados disponíveis, o próximo passo é correlacionar parâmetros de interesse a cada um deles. Pesquisas anteriores se concentraram no desenvolvimento de diferentes métodos e ferramentas geomatemáticas para conexão de parâmetros

metalúrgicos e informações geológicas espacialmente distribuídas. As técnicas correntes para tal finalidade incluem a Modelagem por Regressão Linear e a Modelagem Geoestatística, que serão discriminadas à posteriori (LISHCHUK, 2016).

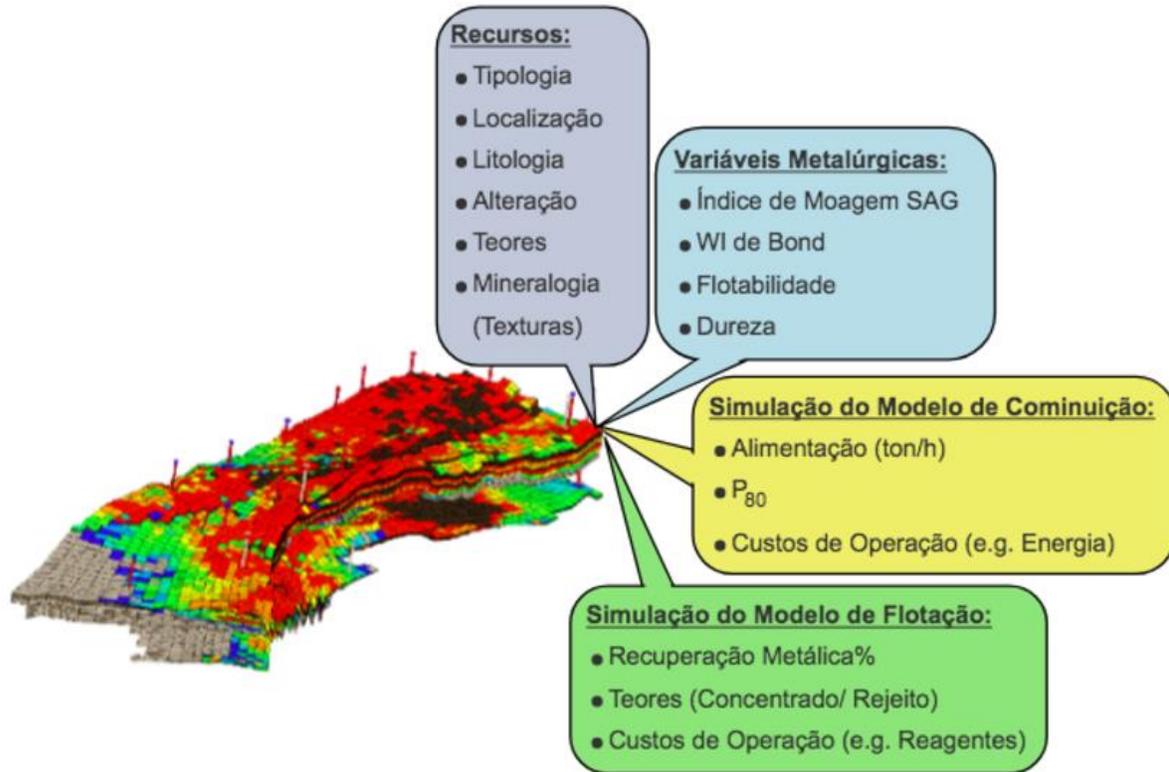


Figura 4.1: Preenchendo o Modelo de Blocos Geometalúrgico.
Fonte: Adaptado de (LAMBERG, 2011b) – “Geometallurgy – What, Why and How?”

A profundidade das modelagens, como será abordado na seção de Programas Geometalúrgicos, variam de acordo com o objetivo do empreendimento mineiro e o enfoque/propósito do modelo que pode servir apenas para coleta e visualização de dados, até o controle e predição total de toda a rota de processo da usina de beneficiamento. A partir desses modelos confiáveis e realistas, com conhecimentos detalhados acerca do corpo de minério, tem-se maior controle sobre o planejamento das operações e produção nas minas, além disso, um maior conhecimento de um corpo mineral está associado à menores riscos na produção e à maiores ganhos econômicos (LAMBERG, 2011b; WILLIAMS & RICHARDSON, 2004; ARROYO ORTIZ, 2014).

4.1 ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR

O método numérico mais utilizado em abordagens geometalúrgicas para atribuir parâmetros ao modelo de blocos é a Regressão Linear. Em um modelo de regressão objetiva-se descrever informações geológicas mais complexas a partir de correlações de informações mais acessíveis, como os teores, passíveis de determinação logo nas primeiras etapas de exploração e amostragem. O coeficiente de correlação é a ferramenta responsável por inferir o grau de relação que essas variáveis (dependentes e independentes) possuem entre si. As variáveis independentes são usadas para estimar direta ou indiretamente uma variável dependente. Ou seja, uma variável dependente é desvendada por informações atribuídas a variáveis independentes. Exemplos seriam teores de elementos químicos (variável independente); recuperação metalúrgica (variável dependente).

O coeficiente de correlação entre duas variáveis x e y pode ser calculado com base em amostras (mais frequente), ou com base na população; e apresenta o seguinte domínio matemático [$-1 \leq r \leq 1$], os valores iguais a -1 e 1 , são tomados como correlações perfeitas negativa/positiva.

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{[\sum(x_i - \bar{x})^2]^{1/2}[\sum(y_i - \bar{y})^2]^{1/2}}$$

O teste de hipótese para correlação, verifica se o coeficiente obtido é estatisticamente significativo. Quando as variáveis apresentam coeficiente significativo, essas podem ser usadas na construção de um Modelo de Regressão, que podem ser baseados em Regressões Simples, ou Múltiplas (relação linear entre uma variável dependente e duas ou mais variáveis independentes). Após a construção de um modelo de regressão válido e que obedeça às suposições, deve-se assegurar de que este seja significativo para análise de toda a população. Isto é garantido com a "Validação do Modelo", cujas abordagens mais comuns incluem: coleta de nova amostra e comparação com os resultados do modelo anterior; coleta de nova amostra com geração de novo modelo (VIEIRA, 2016; FERNANDES, 2013).

No trabalho de FERNANDES (2013) foi calculada uma matriz de correlação para os dados geometalúrgicos. A partir dessa matriz o seguinte Modelo de Regressão para a Recuperação Mássica foi construído:

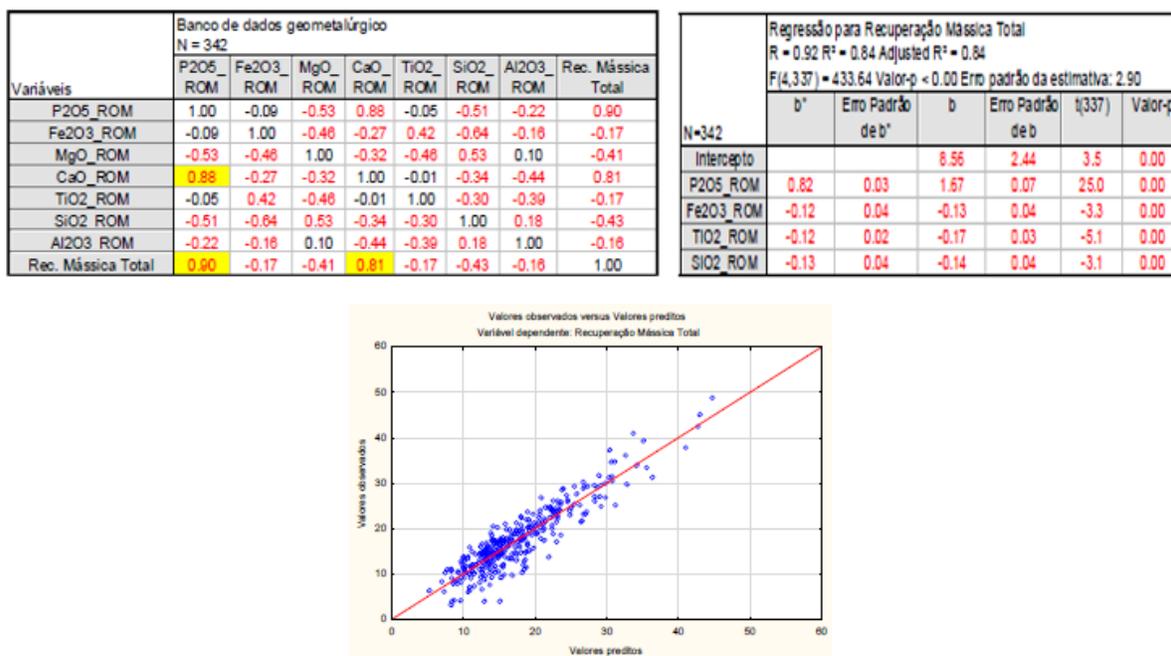


Figura 4.2: Matriz de Correlação e Modelo de Regressão para a Recuperação Mássica.
Fonte: (FERNANDES, 2013)

A correlação de teores de Fe2O3, SiO2 e TiO2 com a variável dependente não é tão alta, mas quando analisadas conjuntamente, a sua influência sobre a recuperação mássica é grande e se torna importante na predição da recuperação.

A partir do trabalho de BOISVERT et al. (2013), ainda concernente à análise de regressão linear, sabe-se que na mina estudada por tal pesquisador, Olympic Dam (Mina Australiana de Cu & U, operada pela BHP), as variáveis de interesse para o desempenho da planta incluem: a recuperação de Cu & U3O8; o consumo de ácido; a recuperação líquida; o índice de fragmentação com Teste Drop Weight; e o índice WI de Bond. As variáveis mais amplamente amostradas para associações de minerais, tamanhos de grãos e propriedades mineralógicas também são modeladas e usadas para prever o desempenho da planta de beneficiamento.

Um modelo de regressão linear dos dados disponíveis é desenvolvido e fornece um modelo preditivo com correlações para as variáveis de desempenho da planta variando de 65-90 %. Existem 204 variáveis com amostras suficientes para serem consideradas neste modelo de regressão, e a relação entre essas e as 6 variáveis de desempenho são simuladas e usadas para gerar modelos de recuperação de Cu e U3O8. A desvantagem de um modelo de regressão linear é que todas as variáveis de entrada são necessárias para a predição. A metodologia empregada para geração de tal modelo na mina de Olympic Dam consistiu nas etapas seguintes:

1. Remoção de variáveis sem importância e redundantes;
2. Transformação univariada quantil-quantil para uma distribuição gaussiana;
3. Junção de variáveis (nível 1). Redução de 112 variáveis de entrada para 23;
4. Mescla das variáveis (nível 2). Redução de 23 variáveis mescladas para 4;
5. Regressão nas 4 variáveis (A, B, C, D) e variáveis de desempenho da planta;

A - Contém como variáveis de performance da planta, B - Estimativa de teores de elementos dos furos, C - Variáveis da Caracterização Mineralógica, D - Variáveis de Associação Mineralógica (Texturas);

6. As distribuições previstas são parametrizadas por valores médios e variância em unidades Gaussianas;

7. Determinação de incertezas do modelo (BOISVERT *et al.*, 2013).

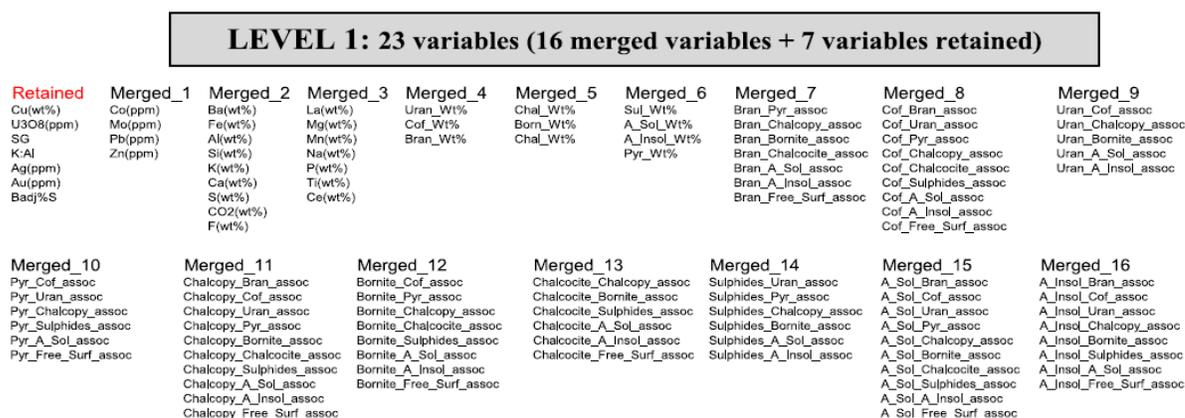


Figura 4.3: Exemplo do “nível 1” de agrupamento de variáveis para confecção do modelo. Fonte: (BOISVERT *et al.*, 2013)

4.2 MODELAGEM GEOESTATÍSTICA

A geoestatística baseia-se no pressuposto de que as amostras em um conjunto de dados geológicos possuem correlação entre si no espaço. Uma vez determinada a correlação, ela pode ser usada para prever valores entre dados existentes. É utilizada no tratamento de variáveis regionalizadas, isto é, variáveis aleatórias (valor numérico determinado pelo acaso em diferentes experimentos) que levam em conta variabilidades locais que se refletem em larga escala, por exemplo em um corpo de minério.

A geoestatística se baseia em uma modelagem probabilística, pavimentada por diversas técnicas estatísticas para analisar a distribuição de variáveis no corpo de minério. Pode ser usada para Análise (Variograma), Estimativa (Krigagem) ou Simulação.

4.2.1 Análise por Variogramas

O variograma é a unidade básica de um estudo geoestatístico, baseia-se em funções matemáticas que se aproximam da distribuição espacial dos materiais no depósito de acordo com o conjunto de amostras que contém dados geológicos conhecidos. Normalmente por motivos de simplificação, o semivariograma que é utilizado. Variograma = $2\gamma(h)$ e Semi-Variograma = $\gamma(h)$

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad \gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

Sendo, $N(h) = n^\circ$ de pares de valores a uma distância h ; $z(x_i)$ é o valor da variável z no ponto x_i ; e $z(x_i + h)$ é o valor da variável z em $x_i + h$.

ARROYO ORTIZ (2014) diz que é importante realizar uma análise estatística preliminar dos dados antes de se realizar a variografia, pois através desta análise pode-se ter uma ideia à respeito do conjunto de dados de uma forma condensada por meio do cálculo de parâmetros estatísticos tais como média, variância, valores máximo e mínimo.

Os variogramas podem ser de caráter "experimental", que é baseado em amostras, "verdadeiro", baseado em toda a população de amostras (depósito 100% explorado) ou "teórico", modelo matemático usado como predição dos pontos/blocos de variáveis não amostradas. Na maioria das vezes a Anisotropia estará presente, isto é, a variabilidade se diferencia para direções dissemelhantes.

Em sua tese ARROYO ORTIZ (2014) realizou modelagem variográfica utilizando o software Isatis para as variáveis mineralógicas representantes das tipologias do depósito que se baseava seu estudo. Inicialmente calculou-se variogramas experimentais em direções distintas (verificação de anisotropia ou isotropia), seguidos do ajuste desses para direções preferenciais em caso de anisotropia. Mapas variográficos que permitem verificar o comportamento da variabilidade segundo as direções e os planos também foram confeccionados. Para cálculo de variogramas experimentais é necessário estabelecer parâmetros, alguns definidos em tal estudo, foram: o nº de direções que seriam analisadas e o tamanho e nº de passos. Partiu-se do fato de que as variáveis eram analisadas sob um mesmo plano de referência. Os variogramas experimentais e mapas variográficos foram construídos para todas as variáveis seguindo essa metodologia, um exemplo para a variável Magnetita Global, se encontra exemplificado pela figura 4.4.

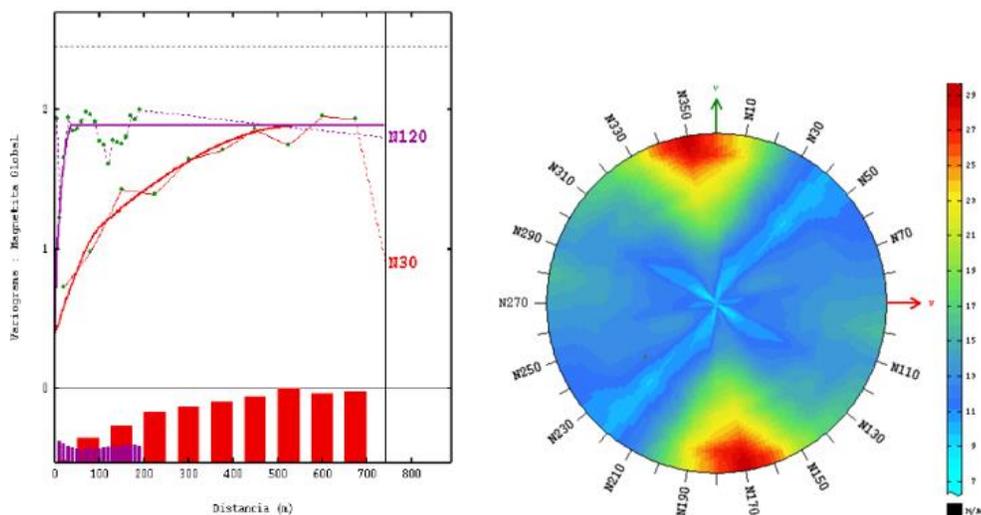


Figura 4.4: Variogramas segundo as direções preferenciais e a vertical para a variável mineralógica magnetita global e um mapa variográfico para a mesma variável.

Fonte: (ARROYO ORTIZ, 2014)

Com a finalidade de verificar a adequação do modelo variográfico construído para predições espaciais das variáveis a técnica de Validação Cruzada sempre é usada posteriormente, mas não será abordada com detalhes nesse trabalho.

4.2.2 Estimativa por Krigagem

Essa técnica permite estimar variáveis do modelo em locais que não foram amostrados a partir de variogramas que estudam o comportamento de variabilidade dessas variáveis no espaço. A krigagem estima as variáveis em um ponto/bloco a partir de uma combinação linear de amostras vizinhas, com erros de estimativas minimizáveis. Engloba as variações Simples, Ordinária e Co-Krigagem.

Em uma estimativa ordinária, temos que: $Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda * Z(x_1)$

Sendo, $Z^*(x_0)$ a estimativa da variável Z no ponto x_0 ; $Z^*(x_1)$ é a estimativa da variável Z no ponto x_1 ; os ponderadores (λ) são adotados para estimar um valor de:

Variância mínima da estimativa $\rightarrow \sigma_{KO}^2 = \sum \lambda * \gamma(x_0 - x_1) + \mu$

De forma que quanto maior a proximidade das amostras ao ponto a ser estimado, maior a influência deste; e quanto maior a correlação entre as amostras, menor o peso individual que o ponderador irá causar. Matricialmente, o sistema de Krigagem é dado por ARROYO ORTIZ (2014):

$$[K] = \begin{bmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \gamma(x_1, x_2) & \dots & \gamma(x_1, x_n) & 1 \\ \gamma(x_2, x_1) & \gamma(x_2, x_2) & \dots & \gamma(x_2, x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n, x_1) & \gamma(x_n, x_2) & \dots & \gamma(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad [M] = \begin{bmatrix} \gamma(x_1, x_0) \\ \gamma(x_2, x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n, x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad [\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix}$$

[K], [M] e $[\lambda]$ correspondem, respectivamente, à matriz dos variogramas entre (as amostras), a matriz dos variogramas entre (as amostras e o bloco a estimar) e a matriz dos ponderadores.

Para validação desses modelos de Krigagem, confronta-se de forma iterativa as amostras e valores estimados com os valores reais. Algumas das principais técnicas utilizadas são Validação Cruzada; Variância de Krigagem; Variância de Interpolação e Método do Polígono de Influência.

Para a maioria das estimativas de variáveis geometalúrgicas, existem incertezas nos parâmetros do modelo, então abordagens estocásticas serão feitas, uma das mais utilizadas é baseada na Simulação de Monte Carlo. Os métodos estocásticos não assumem qualquer pressuposto sobre a linearidade da variável e podem modelar as incertezas espaciais, permitindo avaliação de riscos técnicos e econômicos. A krigagem por sua vez, não é muito indicada, por ser um método determinístico que assume a linearidade das variáveis, o que nem sempre ocorre, a recuperação metalúrgica por exemplo é não-linear (FERNANDES, 2013; WILLIAMS & RICHARDSON, 2004; LOPERA, 2014; LAMBERG, 2011).

Em artigo científico publicado por VIEIRA *et al.* (2015), foi realizada uma Krigagem para modelagem geometalúrgica em um depósito de Zinco, com quatro indicadores/domínios estabelecidos segundo o depósito mineral:

(BXW) - brecha willemítica: tipologia mais rica em zinco;

(BXD) - brecha dolomítica: possui zinco, porém contém alto teor de dolomita. (Mg é deletério no Beneficiamento de Zn);

(BXH) - brecha hematítica: tipologia com alto teor de ferro, além de possuir zinco;

(Estéril) - diversos tipos de rocha que não possuem zinco em sua composição.

Semivariogramas foram modelados para os quatro indicadores – para modelar o indicador do BXW, utilizou-se correlação, diferente dos demais. Duas estimativas foram realizadas: uma em um grid englobando toda a área e outra em um grid com maior detalhamento restrito apenas a uma zona de maior interesse. A krigagem dos indicadores reproduziu quatro estimativas, fornecendo assim, a probabilidade de ocorrência de cada uma das classes tipológicas individualmente. A figura a seguir, demonstra o resultado da Krigagem realizada para os quatro domínios:

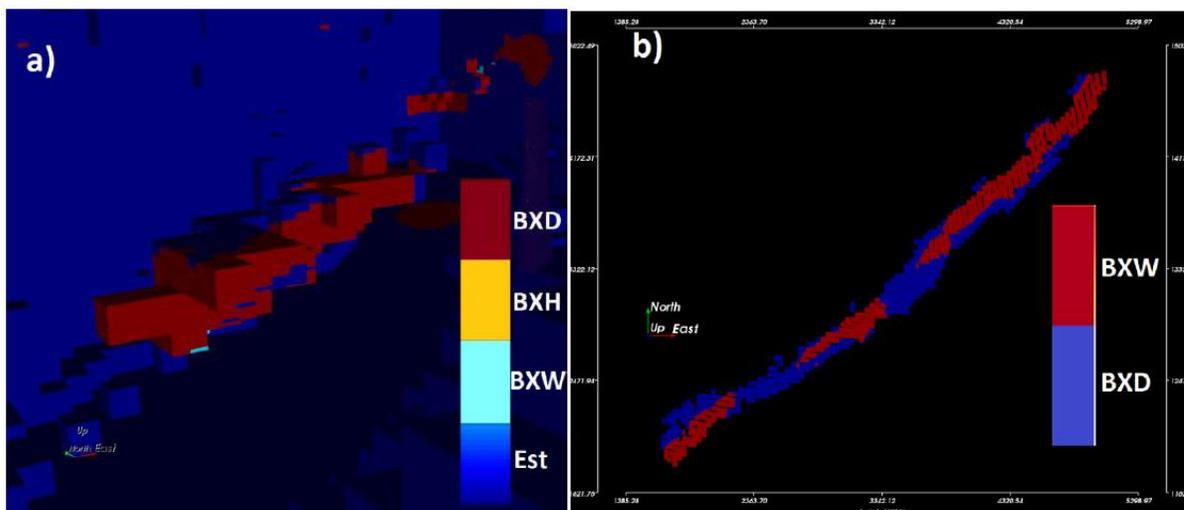


Figura 4.5: Krigagem dos indicadores em a) grid global e b) grid rico em detalhes (zona de interesse).
Fonte: VIEIRA et al. (2015)

4.2.3 Simulação Geoestatística

Como já foi dito, as estimativas não são capazes de reproduzir incertezas em um modelo, dessa forma para Geometalurgia, as simulações são mais eficientes, pois reproduzem variabilidade reais das variáveis estudadas. O conceito básico envolve obter iterações simuladas da função aleatória da variável regionalizada de forma que representem os mesmos parâmetros estatísticos da FA original. A geração de mais de um modelo simulado equivalente não é o único objetivo dessa modelagem, nas próximas páginas desse trabalho, será demonstrado como essa natureza estocástica pode avaliar incertezas em etapas de planejamento mineiro de longo prazo (DEUTSCH et al., 2015; VIEIRA, 2016; ARROYO ORTIZ, 2014; VIEIRA et al., 2015; ISAACS & SRIVASTAVA, 1989; FERNANDES, 2013).

A simulação dos insumos geológicos ou respostas metalúrgicas é uma prática comum para investigar cenários de produção alternativa e estimar os riscos de produção na indústria de mineração. Uma vez que os modelos estejam completos e passíveis de simulação, é possível obter variáveis de desempenho metalúrgico como consumo de energia, recuperação/teor do concentrado e características do rejeito para cada bloco ou blend da alimentação.

As simulações serão realizadas por qualquer simulador capaz de combinar os processos de cominuição e flotação em um Modelo de Produção, uma vasta gama de abordagens foi desenvolvida para essa finalidade e um dos mais utilizados no mercado é o MinnovEX da empresa SGS (CEET & FLEET), um estudo detalhado envolvendo tal ferramenta será abordado no próximo capítulo. (LAMBERG, 2011; LUND & LAMBERG, 2014; LISHCHUK, 2016)

O modelo é fiel ao que foi baseado em sua construção. Caso as premissas forem representativas da realidade e não existam erros matemáticos e computacionais, o modelo é considerado válido e pode ser usado para simular o sistema. Para isso, a coleta de dados deve ser criteriosa, pois um modelo pouco representativo da realidade, pode fazer com que todo um trabalho seja descartado (PINTO, 2002).

5 GERENCIAMENTO E APLICAÇÃO DOS MODELOS GEOMETALÚRGICOS

5.1 O PROGRAMA GEOMETALÚRGICO

Segundo LUND & LAMBERG (2014) & LAMBERG (2011a), O processo de criação, manutenção e utilização dos modelos geometalúrgicos aplicados industrialmente nas operações mineiras é chamado “Programa Geometalúrgico”, que por sua vez segue uma metodologia de construção, como observada a seguir na figura 5.1:

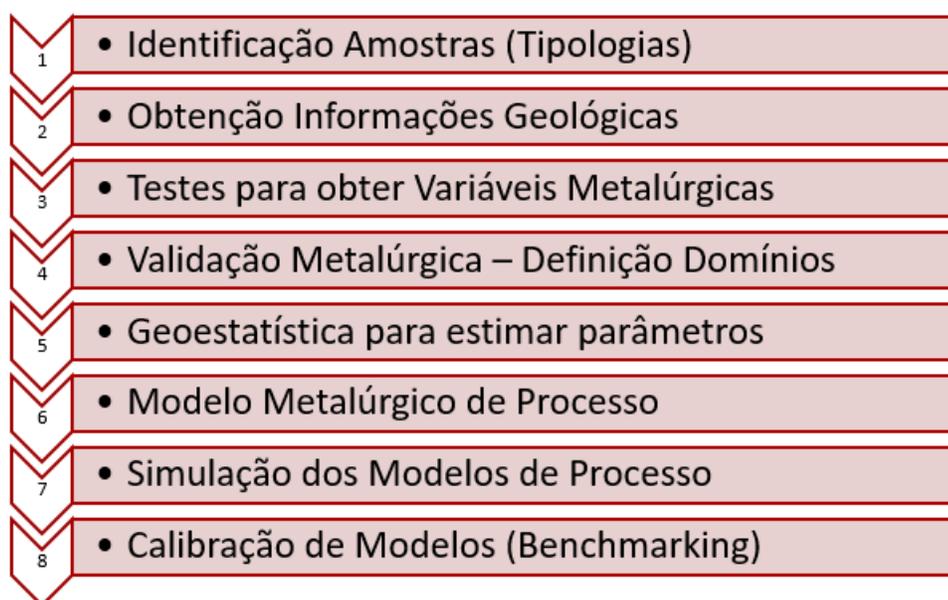


Figura 5.1: Etapas na Construção de um Programa Geometalúrgico.
Fonte: Adaptado de LUND & LAMBERG (2014).

Os programas geometalúrgicos quando comparados aos modelos de blocos tradicionais, apresentam melhor utilização dos recursos do minério; maior eficiência no desempenho metalúrgico; planejamento adequado das operações sustentado pelo conhecimento abrangente do corpo mineralizado; redução dos riscos na operação propiciado por um maior controle dos processos. Esses programas possibilitam ajustes nos processos de cominuição e concentração proporcionando produtos de maior qualidade que atendam aos requisitos de um setor mineral global mutável (LUND; LAMBERG & LINDBERG, 2015).

Considerando sua abordagem relativamente recente, algumas questões ainda não são tão bem compreendidas em si tratando de modelagem geometalúrgica. Quantas amostras são necessárias? Que tipo de testes devem ser usados e o n° de testes usados para obter resultados estatisticamente confiáveis? A informação geológica qualitativa pode ser usada (e.g. Texturas)? Em qual nível de detalhe o modelo deve ser aplicado?

Dependendo da abordagem adotada para a geometalurgia no empreendimento e do nível de informação necessária, um programa pode ou não responder a tais questões enumeradas acima. Geralmente, uma das seguintes abordagens é utilizada:

- 1) Tradicional: Os modelos geológicos e de processo baseiam-se nos ensaios químicos de teores dos testemunhos de perfuratrizes. O estudo da variabilidade espacial é usado para prever parâmetros de desempenho metalúrgico.
- 2) Proxies: O modelo de processo é baseado em um grande número de testes de escala de bancada que descrevem a resposta metalúrgica do minério no processo.
- 3) Mineralógica: os modelos geológicos e de processos baseiam-se na caracterização mineral quantitativa. Esta abordagem possui três níveis de informação: (1D): fases, composição química e modal; (2D): composição química e modal por tamanho de partícula (classe); (3D): composição química e modal, distribuição da Liberação por classes de tamanho de partículas (KOCH, 2017). A figura 5.2 representa como características do corpo de minério de do processamento se conectam para cada tipo de abordagem enumerada acima.

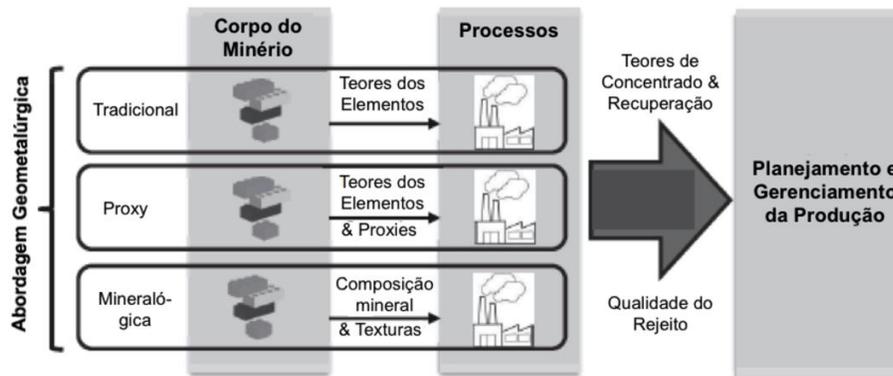


Figura 5.2: O Link entre as características do Corpo de Minério (Geológicas) e do Processo (Metalúrgicas) para as diferentes abordagens geometalúrgicas.

Fonte: Adaptado de (LISHCHUK, 2016).

A classificação dos programas segundo o tipo de abordagem e o grau de profundidade que podem oferecer nas operações é dado na figura 5.3:

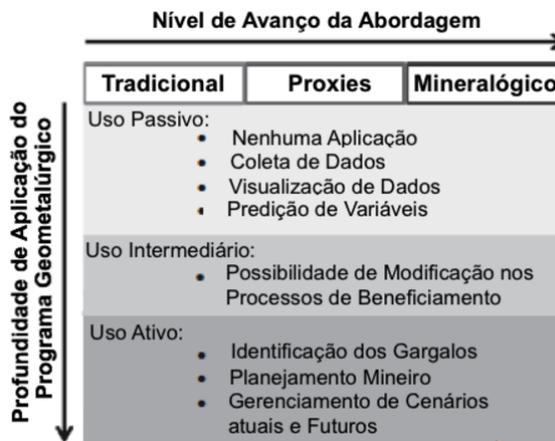


Figura 5.3: Classificação Matricial dos Programas Geometalúrgicos, profundidade da aplicação do programa para as diferentes abordagens geometalúrgicas.

Fonte: Adaptado de (LISHCHUK, 2016)

A tendência é que em empreendimentos onde a Geometalurgia está enraizada nos processos, os programas façam uso da abordagem mineralógica. A abordagem tradicional (passiva) é utilizada em programas de nível superficial e a abordagem de proxies é aplicada entre esses níveis.

Esse conceito de nível de profundidade do programa é definido com base no quanto o modelo pode ser usado no gerenciamento da produção. Em seu trabalho LISHCHUK (2016) identificou oito níveis de aplicação dos programas ordenados pelo grau de envolvimento no gerenciamento da

produção: (0) nenhum envolvimento, (1) apenas coleta de dados, (2) apenas caráter de visualização, (3) previsão, (4) modificações na rota de processo, (5) identificação de gargalos da produção (6) planejamento efetivo de produção e (7) gerenciamento de cenários atuais e futuros de produção. A figura 5.4, indica a posição do programa de várias minas ao redor do mundo em uma matriz (Abordagem x Grau de Profundidade), formulada partir de questionários endereçados aos engenheiros responsáveis pelo processo em cada uma das minas avaliadas.

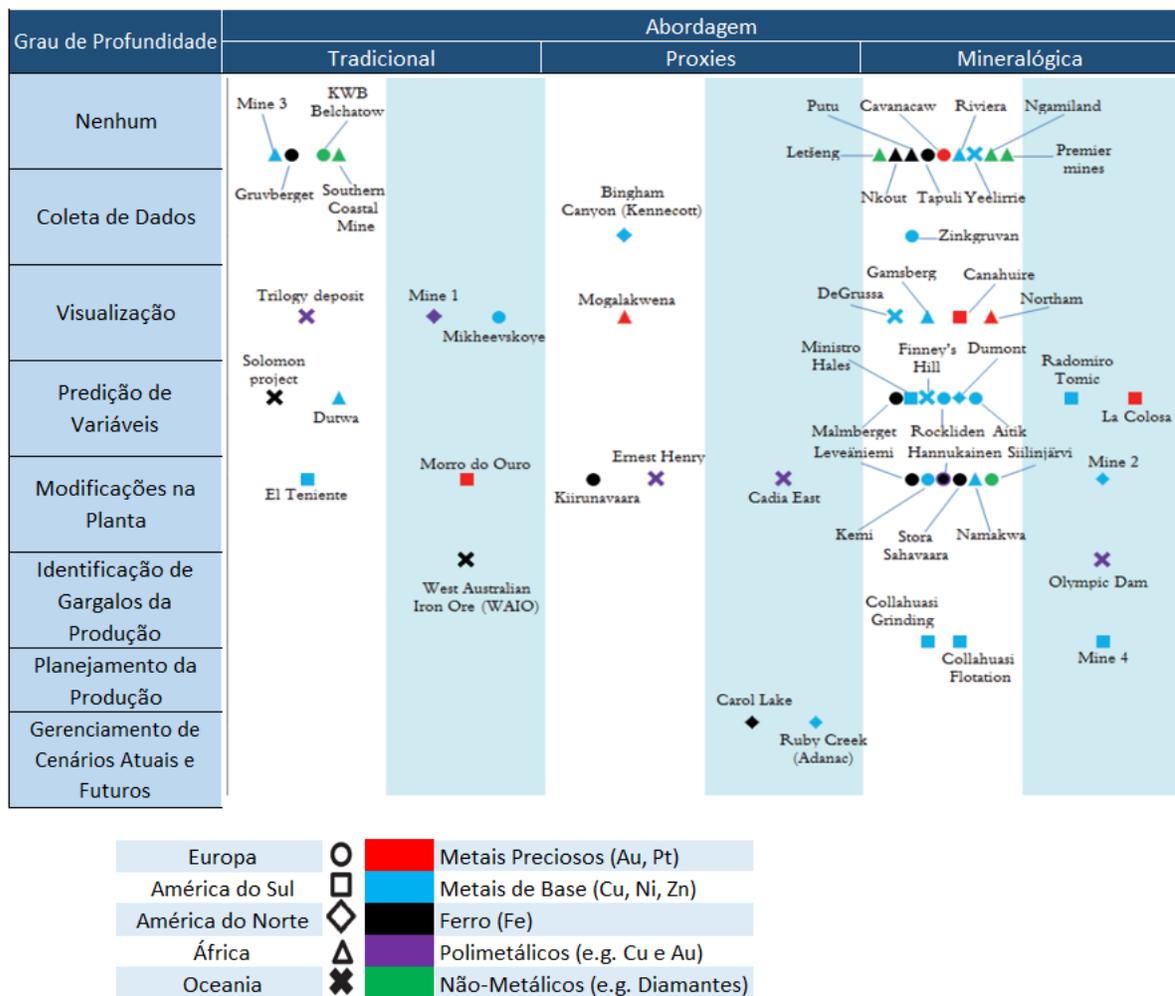


Figura 5.4: Nível de Geometalurgia aplicada em algumas minas e plantas de beneficiamento de classe mundial, para minérios diversos.

Fonte: Adaptado de (LISHCHUK, 2016)

Exemplificando algumas características dos programas para algumas minas inseridas na matriz da figura 5.4:

- 1) Mina de El Teniente (Cu-Mo porfírico, Chile, Codelco) - O programa geomet. prevê a moagem de diferentes tipologias de minério a médio e longo prazos. Relações entre textura de rocha e índice de WI de Bond são estabelecidas. Apenas ações de "modificações na rota de processo" podem ser tomadas.
- 2) Mina de Siilinjärvi (Apatita, Finlândia, Yara) - O baixo teor de apatita, a vastidão do depósito e conteúdos variáveis de mica e carbonato criam demanda para a geometurgia. Na mina Siilinjärvi, existe observação de minerais no ROM, nas rotas de processo plantas e nos produtos (concentrado, rejeito) para resolução de problemas relacionados à moagem e desaguamento; se tratando, portanto, de uma abordagem mineralógica.
- 3) Mina de Kiirunavaara (Fe subterrâneo tipo "Kiruna", Suécia, LKAB) - Programa geomet. composto de duas abordagens. Uma abordagem de proxy, dependente do tubo Davis e ensaios para aplicação em ações de "modificações na rota de processo", de acordo com o teor de sílica e uma abordagem mineralógica apenas para "visualização".

5.2 MODELO DE PRODUÇÃO

5.2.1 Modelo de Produção - Incorporação do Modelo Geometúrgico no Planejamento Mineiro à Longo Prazo

Atualmente existe um incentivo econômico substancial para fazer com que a modelagem geometúrgica e a otimização estocástica/probabilística atuem juntas no desenvolvimento de planejamentos de minas de curto e principalmente longo prazo que atenuem as variabilidades geológicas.

Desenvolvimentos recentes em otimização estocástica resultaram em uma estrutura que pode integrar os modos operacionais em algoritmos estratégicos de planejamento de mina processos com tomadas de decisão diária, mensal e de longo prazo. As técnicas tradicionais determinísticas consideram um único cenário geológico (ou seja, as resultantes de krigagem) para o planejamento

de produção a longo prazo, portanto, não medem a confiança das estimativas de valor presente líquido (VPL) ou *NPV – Net Present Value*, sob variações na geologia regional. A função objetivo (FO) do planejamento estocástico a longo prazo da mina é maximizar o VPL/NPV esperado, tem-se que quando comparadas às técnicas determinísticas, essas abordagens podem incrementar ganhos de VPL em mais de 20% (NAVARRA; GRAMMATIKOPOULOS & WATERS, 2017).

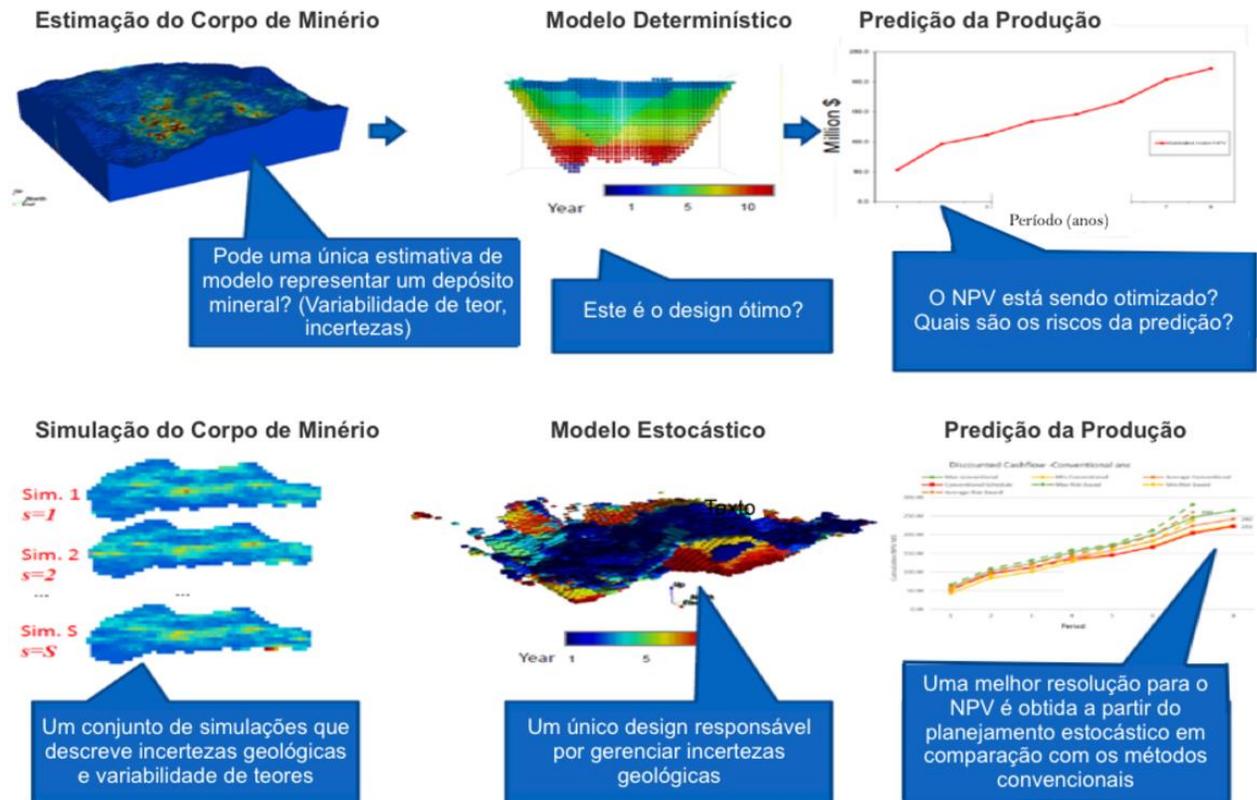


Figura 5.5: Comparativo do Modelo Determinístico x Modelo Estocástico para estimativa do VPL em Planejamentos de Mina.
 Fonte: Adaptado de (NAVARRA; GRAMMATIKOPOULOS & WATERS, 2017).

Para efeito de comparação, as seguintes definições foram propostas por (PINTO, 2002).
 Modelo Determinístico: Otimização, seleciona uma única e exata alternativa por análise matemática, fornece modelos apenas aproximados da realidade.

Modelo Estocástico: Simulação, maior liberdade/flexibilidade de solução, permite a criação de cenários futuros de análise, soluções aproximadas, porém muito mais próximas à realidade.

Como parte de uma estrutura estocástica, os atributos composicionais e morfológicos são atribuídos a cada bloco (b), dependendo do cenário geológico (g). Além disso, o valor de processamento de cada bloco " b " em determinado cenário geológico " g " — é função do modo operacional (o) e pode ser modelado pela fórmula vbg , descrita em NAVARRA; GRAMMATIKOPOULOS & WATERS (2017):

$$v_{bg}^{\text{Process}}(o) = -c_{bg}^{\text{Process}}(o) + \sum_{s \in \mathcal{S}} w_{sbg} \cdot r_{sbg}(o) \cdot v_s^{\text{Selling}}(o)$$

Sendo,

Custo de processamento por unidade de massa de " b " em " g " - $Cbg(o)$;

Fração de peso do mineral " s " dentro do minério do bloco " b " em dado " g " - $Wsbg$;

Fração do mineral " s " dentro de " b " recuperado no fluxo de concentrado - $rsbg(o)$;

Valor de venda líquido de concentrado de minério " s " – vs ; Dado vbg , cbg e vs em (\$/ton).

Conjunto de espécies minerais em consideração - \mathcal{S} .

Geralmente, planejamentos mineiros a longo prazo variam entre 5 e 20 anos e, portanto, o valor de processamento vbg , passa a considerar uma taxa de depreciação monetária anual " d " e a grandeza tempo " t ". Para esse caso; A fórmula – vbg_t – descrita em NAVARRA; GRAMMATIKOPOULOS & WATERS (2017) é expressa abaixo:

$$v_{bgt}^{\text{Process}}(o) = \frac{v_{bg}^{\text{Process}}(o)}{(1 + d)^{t-1}}$$

Na prática, os cenários geológicos " g " considerados nas equações são gerados de acordo com a simulação geoestatística. A principal técnica para tal abordagem são os modelos de variogramas que podem ser usadas para atributos numéricos que variam contínua ou irregularmente no espaço,

descrevendo como esses atributos podem variar entre dois pontos de amostragem (função da distância). A otimização para o VPL/NPV em dois estágios geralmente considera um longo prazo e um curto prazo. Os planejamentos a longo prazo, particularmente, estão sujeitos a uma série de cenários possíveis com base em previsões de atributos geológicos muito incertos (à medida que o corpo é explorado em profundidade).

Sendo;

x - descreve quando os blocos são explorados (decisões de longo prazo);

y_g - descreve quando os blocos são processados (decisão de curto prazo se o cenário g for realizado).

$$\mathbb{E}[\text{NPV}](x) = -c^{\text{Mining}}(x) + \sum_{g=1}^{nG} v_g^{\text{Process}}(x, y_g(x))$$

Nº cenários geológicos (nG);

Custo de mineração, período " t " no cenário " g " em planej. de mina a longo prazo " x " - cgt ;

Valor de depreciação obtido no período " t " no cenário " g ", conforme planej. longo prazo " x " e decisões de curto prazo " y_g " - $v'_g(x, y_g(x))$.

Esforços atualmente estão pautados para que os algoritmos possam também considerar vários cenários econômicos e não só geológicos, abordando a incerteza de preços e do mercado das commodities metálicas juntamente com a incerteza geológica, com possibilidade de foco no valor dos produtos vendidos naquele momento ao invés de valores de blocos individuais.

5.2.2 Modelo de Produção – Incorporação do Modelo Geometalúrgico nas Plantas de Cominuição e Flotação

O valor de cada bloco de minério no modelo de recursos é uma função de componentes econômicos, como os custos de mineração, o preço das commodities, os elementos deletérios que provocam gastos com passivos ambientais, custos de transporte, custos de processamento entre outros. Tais componentes devem ser estimadas e combinadas de forma a se obter o valor verdadeiro para cada bloco de minério.

Duas tecnologias desenvolvidas de forma pioneira no início dos anos 2000 para tais predições são CEET (Ferramenta de Avaliação Econômica de Cominuição) e FLEET (Ferramenta de Avaliação Econômica da Flotação). As configurações ótimas e o design apropriado das plantas de beneficiamento podem ser selecionados usando CEET e FLEET para gerenciar as expectativas de produção. O CEET foi desenvolvido pela empresa SGS, e utiliza uma estrutura habilitada geometalúrgicamente que recebe dados de testes SPI (*SAG Power Index*) e *Bond Index* (WI de Bond) para uma atribuição bloco-a-bloco por todo o modelo de recursos, otimizando os circuitos de cominuição. O planejamento da produção bloco-a-bloco não era possível com os modelos de recursos convencionais e se tornou realidade com essas ferramentas. A ferramenta CEET pode explorar informações derivadas de testes SPI / WI de Bond para:

- projetar o circuito de cominuição ideal para qualquer um dos minérios (tipologias);
- realizar previsões de produção para os circuitos existentes;
- medir e gerenciar o risco de investimento (do ponto de vista do design do circuito de cominuição e do planejamento do processamento).

O FLEET aborda a variabilidade da resposta da flotação em todo o corpo de minério e o efeito que isso tem sobre a previsão da recuperação na rota de concentração. Com o FLEET, parâmetros fundamentais de flotação obtidos de testes laboratoriais são distribuídos por todo o modelo de recursos a partir de ferramentas geoestatísticas. O teor esperado e a recuperação de cada bloco de minério constituem os componentes de custo/receita atrelados à flotação. Um bloco de minério de

baixo teor ou recuperação por exemplo, possui potencial de geração de receita reduzido. A abordagem convencional usada para projetar circuitos de flotação se baseia em testes de flotação laboratorial de amostras que representam as diferentes tipologias de minério. Os resultados de recuperação desses testes são utilizados para atribuir aos tipos de minério, um teor esperado e um percentual de recuperação que supostamente ocorreriam na planta principal. Esta abordagem é intrinsecamente imprecisa e com risco significativo em relação ao design do circuito e gerenciamento de receita pelas seguintes razões:

- A distribuição do tamanho da moagem realizada nos moinhos do laboratório para a amostra de um determinado tipo de minério não pode ser assumida como absoluta para os outros blocos correspondentes ao mesmo tipo de minério, que possuam dureza e tamanho de alimentação diferentes.
- O efeito dos ativadores e depressores sobre as diferentes espécies minerais e tamanhos de partículas bloco-a-bloco não são levados em consideração.

O FLEET fornece essa abordagem de forma muito mais robusta, sendo possível o entendimento de componentes de custos/receitas para a Flotação (KOSICK *et al.*, 2002).

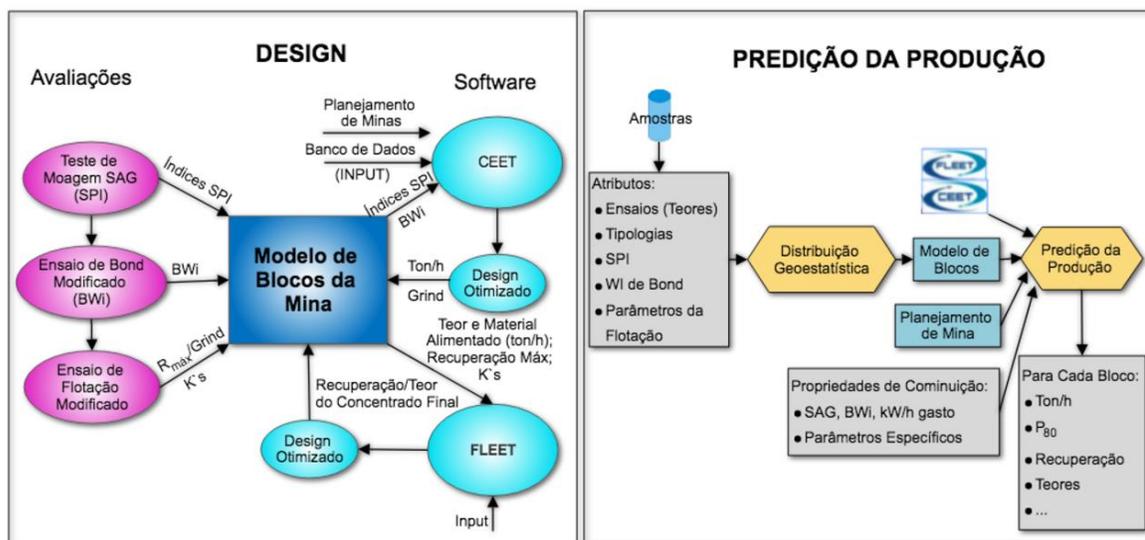


Figura 5.6: As figuras demonstram como o CEET e FLEET trabalham juntos para gerenciar o risco associado à determinação e controle dos componentes custo/receita das operações unitárias de Cominuição e Flotação.

Fonte: Adaptado de (KOSICK *et al.*, 2002).

6 GEOMETALURGIA E AS PERSPECTIVAS FUTURAS

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 mitigar isso. 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 à rota 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).

6.1 ECOMETALURGIA E AS MINAS URBANAS (*URBAN MINES*)

O desenvolvimento de bens de alta tecnologia é responsável por uma alta demanda de algumas matérias-primas. Painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, carros elétricos entre outros possuem em sua composição metais como o antimônio, o tântalo, o índio, o neodímio, o gálio, etc. Com predições que indicam que a demanda de alguns destes metais aumentará fortemente no futuro, o fornecimento desses materiais estratégicos será um desafio para o mundo. A reciclagem de bens de consumo aparece como uma solução para o abastecimento e a economia de recursos estratégicos. Processos inovadores que permitem a recuperação crítica de metais (Ga, In, Terras-Raras) a partir de materiais como placas de circuito impresso estão sendo formulados a partir do zero. A principal tecnologia utilizada é a Hidrometalurgia, em particular a Biometalurgia, o que possibilita limitar os impactos ambientais, como a produção de resíduos residuais, o gasto energético e o consumo de reagentes. A recuperação de alguns metais como In, Ga e ETR dos bens de consumo ainda não foi estabelecida de forma industrial. (BioLIX, Université de Liège).



Figura 6.1: “Ciclo de Vida” de um Aparelho Celular, com reciclagem de metais de valor. “Ecogeometalurgia”.
 Fonte: Adaptado de (PIRARD, 2015)

É nesse cenário que PIRARD (2015) em um de seus seminários, aborda o conceito até então futurista, das Minas Urbanas (Urban Mines) que consiste em formular rotas inovadoras de processos de beneficiamento, com equipamentos de tecnologia de vanguarda desenvolvidos para tais finalidades, de forma a extrair recursos minerais (elementos metálicos) do chamado "lixo eletrônico" - REEE (Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos).

As mentalidades mais inovadoras da indústria hoje predizem que no futuro os bens de consumo não serão otimizados apenas em relação à sua funcionalidade, mas também em torno de sua reutilização, reciclabilidade e disponibilidade sustentável dos recursos. Alguns dos principais aspectos e desafios encontrados para essa nova tecnologia são em torno de:

- 1) Concentrações Metálicas: Muitas vezes apenas metais preciosos (Au, Pt, Pd, Ir) pagam pela reciclagem, devido ao custo elevado da rota de beneficiamento. Apenas para exemplificar alguns teores metálicos componentes de um dispositivo - Placa de Circuito de Computadores: Cu, Zn, Al, Pb, Sn, etc. (35%); Au 100-1000g/t; Ga 30g/t; In 30g/t; Nd 300g/t.

- 2) Especificação do Metal: Ampla variedade de ligas (Ni, Al), conseqüentemente uma difícil separação por meios físicos (necessidade de classificação ótica inovadora)
- 3) Paragênese do Metal: Montagens metálicas inesperadas e.g. Fios condutores elétricos de Al revestidos por Cu; Associação com elementos deletérios como Hg e As.
- 4) Homogeneidade: A fugacidade da evolução tecnológica, obriga o design das plantas montadas a serem adaptáveis e flexíveis de acordo com o material que será processado. (E.g. Lâmpadas Filamento W > Lâmpadas Fluorescentes > Lâmpadas de LED).
- 5) Volume de material: Certificar que grandes quantidades de "lixo eletrônico" alimentem a planta, suficientes para pagar os elevados custos.
- 6) Mobilidade das Minas Urbanas: Não existe o condicionante geológico das minas reais; menor burocracia legislativa, etc....

O bioprocessamento metalúrgico é ainda uma ferramenta incipiente e pouco aplicada em escala industrial. Trata-se de uma tecnologia menos invasiva do ponto de vista ambiental - não há geração de gases nocivos e efluentes tóxicos, além de apresentar uma maior simplicidade funcional e baixo custo. Existem alguns desafios técnicos para a aplicação prática desses processos: o uso industrial da bio-lixiviação possui como limitante a capacidade cianogênica dos micro-organismos formadores da lixívia e a recuperação do metal da solução formada é muitas vezes ineficaz. Alguns laboratórios de genômica vêm desenvolvendo cepas modificadas que otimizam a interação dos micro-organismos com os metais. Além de lidar com rotas do processamento de REEE, a biometalurgia pode ser usada de maneira mais tradicional.

A implementação da flotação revolucionou o beneficiamento mineral e tornou economicamente viável a exploração de minérios de baixa qualidade. Outrora, a eficiência desse processo era relativamente baixa, recuperações metálicas de 60 a 70% eram comuns, na flotação moderna esses valores podem atingir entre 85 e 90%. Isto é, antigas minas de minérios flotados de Cobre com teores entre 1 e 2% em peso de Cu, podem contar em suas barragens de rejeitos cerca de 0,3-0,7%

de Cu. Em um contexto de escassez de alguns minerais e minas operando com teores cada vez mais baixos de Cu e Au, por exemplo, esses rejeitos são encarados como potenciais minas.

Um exemplo de metodologia para a abordagem biogeometalúrgica de depósitos típicos de cobre porfírico é discutida abaixo. Como forma de prever os parâmetros do processo e explorar tais depósitos secundários, é realizada uma combinação dos parâmetros mineralógicos (cuja metodologia já foi discutida neste trabalho) com uma extração sequencial de sete passos desenvolvida para a mineralogia primária e secundária presente no minério pórfiro de cobre. Sendo os seguintes: liberação da fração solúvel em água; Liberação da fração permutável; abordagem da fração de oxihidróxidos de Fe (III), dissolução da fração de óxidos de Fe (III); dissolução da matéria orgânica, sulfetos de cobre enriquecidos e sulfetos de tipologia primária; dissolução de sulfetos primários mais resistentes e por último, dissolução da fração residual (silicatos). As soluções de lixiviação são então analisadas por espectroscopia de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-AES). Além dos elementos típicos identificados nas lixívias, os ETR também são analisados. As correlações de dados das extrações sequenciais com a caracterização mineralógica são utilizadas para prever a formação de Drenagem Ácida de Mina e a Liberação de elementos de qualquer material extraído. Este conjunto de dados permite definir unidades biogeometalúrgicas para prever o comportamento geometalúrgico (cominuição, flotação, formação de DAM, bio-lixiviação e liberação de elementos) nos diferentes processos de exploração.

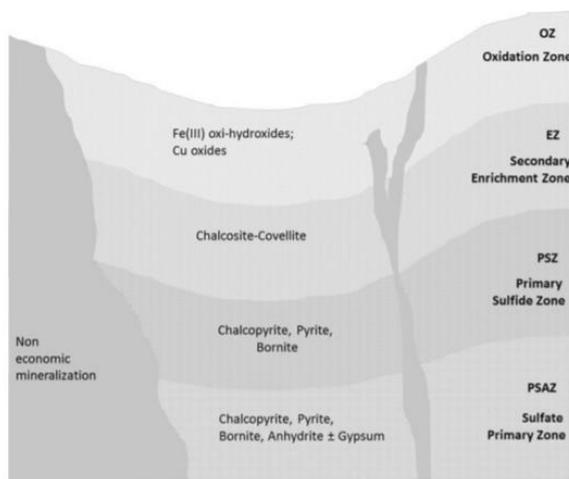


Figura 6.2: Esquema representativo de diferentes unidades biogeometalúrgicas em um corpo de minério de Cobre Porfírico.
Fonte: DOLD *et al.* (2013)

Comportamento e efeito de cada unidade biogeometalúrgica ao longo dos processos de Lixiviação/Controle de Rejeitos:

- 1) OZ: Boa lixiviação devido à presença de minerais metálicos solúveis e a acidez dos hidróxidos de Fe (III). Contaminantes como o arsênio mantêm-se inertes e fixos aos hidróxidos de Fe (III) em ambientes de oxidação e acidificação.
- 2) EZ: Adequado para a lixiviação devido à presença de sulfetos de Cu supergênico; formação de Drenagem Ácida de Mina (DAM) devido à oxidação de sulfetos.
- 3) PSZ: Não é adequado para bio-lixiviação devido a predominância de calcopirita e formação de DAM, devido à oxidação de sulfetos.
- 4) PSAZ: Não é adequado para a bio-lixiviação devido ao domínio da calcopirita, formação de DAM devido à oxidação do sulfeto. A presença de sulfatos pode diminuir a cinética de oxidação dos sulfetos. (OBS: Hidróxidos de Fe (III): inclui hidróxidos de Fe (III) e oxihidróxidos) (DOLD *et al.*, 2013; ILYAS & CHUN-LEE, 2014).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Abordou-se de forma essencialmente qualitativa as principais feições para compreensão da modelagem geometalúrgica. As amostras e conceitos apresentados nessa monografia foram precedidas de intensa pesquisa e revisão bibliográfica, possibilitando após leitura crítica principalmente de artigos, dissertações e teses solidificar o conhecimento acerca desse tema que fora previamente investigado por profissionais da área.

A maior parte das fontes contempladas no trabalho são de caráter terciário, isto é, material encontrado em teses e dissertações, que congregava conceitos de fontes primárias para sua construção. Deve-se isso ao fato da geometalurgia não se tratar de uma ciência por si só, sendo pautada como já discutido anteriormente pelo caráter multidisciplinar de sua aplicação, envolvendo as grandes áreas da Geologia, Mineração, Metalurgia e até mesmo Ciências Econômicas. Dessa forma, a maior parte das discussões envolvia tratamento de conceitos dessas grandes áreas que quando em comunhão formavam conceitos globais acerca dessa temática.

Um estudo teórico baseado em revisão de literatura certamente não é de desenvolvimento menos complexo do que uma abordagem empírica. O ato de revisar de forma exploratória um tema de grande relevância pouco abordado durante a graduação é uma tarefa árdua que impulsiona o aprendizado e amadurecimento do profissional enquanto pesquisador. (VIANNA, 2001) afirma em seu livro que “para proporcionar o avanço em um campo do conhecimento é preciso primeiro conhecer o que já foi realizado por outros pesquisadores e quais são as fronteiras do conhecimento naquela área”.

O avanço de bibliotecas digitais mantenedoras de artigos e periódicos, tal qual o “*ScienceDirect*” e o “Periódicos Capes”, desmistificaram em partes essa tarefa, visto que trazem recursos de busca e cruzamento de informações que possibilitaram melhor compreensão da estrutura global de um Programa Geometalúrgico, obviamente, essas tecnologias não solucionam todos os problemas, conclui-se então o caráter imprescindível de uma avaliação técnica e de juízo crítico do pesquisador, sustentada pelo conhecimento adquirido em diversas áreas componentes da geometalurgia ao longo de toda a graduação, como o Processamento de Minerais, a Pesquisa Operacional e a Geoestatística.

Nesse trabalho buscou-se uma imersão no conceito da Geometalurgia, abordada efetivamente de forma muito tímida pelas disciplinas tradicionais dos cursos de Engenharia voltados às Ciências da Terra.

A congregação de diferentes profissionais, como geólogos de minas, engenheiros de minas e metalurgistas resulta em uma compreensão abrangente de toda a cadeia de produção de um empreendimento mineiro, grande parte dessa cadeia como os circuitos de cominuição, flotação e o planejamento mineiro foram aqui abordados em um contexto geometalúrgico.

Com a finalidade de estudar um Modelo Geometalúrgico, suas componentes precedentes foram destrinchadas, indicando como a abordagem geometalúrgica pode superar o mais completo modelo de blocos de recursos, visto que abrange não apenas a variabilidade de associações minerais, tipologias ou teores de minérios examinados em um Modelo Geológico, mas também características inerentes ao processo de recuperação metalúrgica que influenciam as características de cominuição/flotação do Modelo de Processos, como as Texturas Minerais.

Considerando pesquisas futuras complementares à essa monografia, as influências da geometalurgia estritamente em parâmetros econômicos como gastos e aumento de receitas a longo prazo poderiam ser aprofundados. Ao longo do processo de revisão da literatura, percebe-se que concernente às colaborações de geólogos e engenheiros de processo, a evolução da abordagem é notável, porém observa-se uma carência de análises tangenciando a influência da geometalurgia nas dimensões de negócios e avaliações financeiras.

Assim, observa-se que os objetivos estabelecidos previamente foram cumpridos de forma exitosa, o Modelo Geometalúrgico e suas aplicações tradicionais foram teoricamente aprofundados e observações incipientes, envolvendo conceitos pouco praticados no setor atualmente, tal qual as “Minas Urbanas” e a Biometalurgia foram introduzidos e ponderados sob a ótica da sustentabilidade na extração de recursos.

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.
- BARNUEVO, L. P. **Caracterización Automatizada de Texturas de Menas mediante análisis digital de imagen para su aplicación geometalúrgica**. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid , v. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, 2014.
- BAUM, W; N. O. LOTTER; P. J. WHITTAKER. **Process mineralogy - A new generation for ore characterization and plant optimization**. SME Annual Meeting. Denver, Colorado: [s.n.]. 2004. p. 04-12.
- BOISVERT, JEFF.B; MARIO E. ROSSI; KATHY EHRIG; CLAYTON V. DEUTSCH. Geometallurgical Modeling at Olympic Dam Mine, South Australia. **International Association for Mathematical Geosciences**, 13 Julho 2013. 25 p.
- BRADSHAW, D. J. **The role of ‘process mineralogy’ in improving the process performance of complex sulphide ores**. International Mineral Processing Congress. Santiago: [s.n.]. 2014.
- 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.
- 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.

COWARD, S; VANN, J; DUNHAM, S; STEWART, M. **The Primary-Response Framework for Geometallurgical Variables**. Seventh International Mining Geology Conference. Perth: [s.n.]. 2009. p. 109-113.

CRAIG, JAMES; VAUGHAN, DAVID. **Ore Microscopy and Ore Petrography**. 2nd ed. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, INC, 1994.

DEUTSCH, JARED; KEVIN PALMER; CLAYTON V. DEUTSCH; JOZEF SZYMANSKI; THOMAS H. ETSSELL. Spatial Modeling of Geometallurgical Properties: Techniques and a Case Study. **International Association for Mathematical Geosciences**, Alberta, 4 Julho 2015. 21 p.

DIMITRAKOPOULOS, R. **Simultaneous Stochastic Optimization of Mining Complexes and Mineral Value Chains**. Kinross Technical Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2017. p. 71 p.

DOLD, BERNARD; WEIBEL, LEYLA. **Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: an approach to increase sustainability in the mining process**. Mining and the Environment - Understanding Processes, Assessing Impacts and Developing Remediation. Berlin: [s.n.]. 2013. p. 10f.

DONSKOI. Comparative study of iron ore characterisation using a scanning electron microscope and optical image analysis. **Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B)**, Kenmore, v. 122, n. n° 4, p. 217-229, 2013.

DUNHAM, S; VANN, J. **Geometallurgy, Geostatistics and Project Value — Does Your Block Model Tell You What You Need to Know?** Project Evaluation Conference. Melbourne: [s.n.]. 2007. p. 1-8.

EHRIG, KATY; VANESSA LIEBEZEIT. **Embedding Geometallurgy into Mine Planning Practices**. BHP Billington - Power Point Presentation. [S.l.]: Resource Planning and Development Team. 2016. p. 31 p.

EMERALD - Erasmus Mundus Master in Georesources Engineering. **EMerald - Erasmus Mundus Master in Georesources Engineering**, 2017. Disponível em: <<http://www.emerald.ulg.ac.be/>>. Acesso em: 21 Maio 2017.

FERNANDES, F. G. **Estudo do melhor método de extrapolação de regressão múltipla para construção do modelo geometalúrgico de uma mina de fosfato brasileira.** Ouro Preto: Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Universidade Federal de Ouro Preto, v. 130 f., 2013.

FERREIRA, R. F. **Estudo de Liberação das Fases Minerais em Minérios de Ferro.** Ouro Preto: Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, v. 211 p., 2013.

GAUDIN, A. M. **Principles of Mineral Dressing.** Nova Délhi: McGraw Hill, 1939.

GEOLOGY UMass. **Geology Department - UMass Amherst.** Disponível em: <<http://www.geo.umass.edu/courses/geo311/min%20chem%20analysis%20lecture.pdf>>. Acesso em: 06 Junho 2017.

GRASSO, C. B. **Geologia e Geometalurgia dos Minérios de Fosfato na base do manto de intemperismo da Mina do Barreiro, Araxá.** Brasília: Universidade de Brasília - Instituto de Geociências, 2015.

ILYAS, S.; CHUN-LEE, J. Biometallurgical Recovery of Metals from Waste Electrical and Electronic Equipment: a Review. **ChemBioEng Reviews**, Weinheim, v. 1, n. 4^a, p. 148-169, 2014.

ISAAKS, E.H; SRIVASTAVA, R.M. **Applied Geostatistics.** Nova Iorque: Oxford University Press, Inc., v. I, 1989.

JAIME, P., GOTTLIEB, P., BUTCHER, A. E DOBBE, R. **The Applicability of automated mineralogy on process planning, process optimisation, quality control, audit studies and trouble shooting, with emphasis on processing plants.** Proceedings of Procemin Conference. Santiago: [s.n.]. 2009.

KOCH, P.-H. **Textural variants of iron ore from Malmberget - Characterization, comminution and mineral liberation.** Luleå : Luleå University of Technology, v. 105 p., 2013.

KOCH, P.-H. **Particle Generation for Geometallurgical Process Modeling**. Luleå: Luleå University of Technology, v. 126 p., 2017.

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, P; J ROSENKRANZ, C WANHAINEN, C LUND, F MINZ. Building a Geometallurgical Model in Iron Ores using a Mineralogical Approach with Liberation Data. **AusIMM International Geometallurgy Conference**, Brisbane, September 2013a. 317-324.

LAMBERG, PERTTI; LUND, CECILIA. Geometallurgy – A tool for better resource efficiency. **European Geologist**, n. 37, p. 39-43, Maio 2014.

LAMBERG, PERTTI; LUND, CECILIA; LINDBERG, THERESE. Practical way to quantify minerals from chemical assays at Malmberget iron ore operations – An important tool for the geometallurgical program. **Minerals Engineering**, Lulea, Agosto 2013b. 7-16.

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.

LAYTON-MATTHEWS, D; C. HAMILTON; M.B. MCCLENAGHAN. Mineral chemistry: modern techniques and applications to exploration. **26th International Applied Geochemistry Symposium**, Rotarua, 17 Novembro 2013. 9-18.

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

LOPERA, P. A. M. **Geometallurgical Mapping and Mine Modelling - Comminution Studies: La Colosa Case Study, AMIRA P843A**. 88 f. ed. Hobart: University of Tasmania, 2014.

LUND, C. **Mineralogical, Chemical and Textural Characterisation of the Malmberget Iron Ore Deposit for a Geometallurgical Model**. Luleå : Luleå University of Technology Universitetstryckeriet, 2013.

LUND, C; PERTTI LAMBERG, THERESE LINDBERG. Development of a geometallurgical framework to quantify mineral textures for process prediction. **Minerals Engineering**, 2015. 17.

LUND, CECILIA; LAMBERG, PERTTI. Geometallurgy – A tool for better resource efficiency. **European Geologist**, n. 37, p. 39-43, Maio 2014.

MWANGA, A.-R. **Development of a Geometallurgical Testing Framework for ore Grinding and Liberation Properties**. Luleå: Luleå University of Technology, 2016.

NAVARRA, A; GRAMMATIKOPOULOS, T; WATERS, K. **Submitted - The International Journal of Mineral Processing**, 2017. 12 p.

NEUMANN, REINER; CLÁUDIO LUIZ SCHENEIDER, ARNALDO ALCOVER NETO. Caracterização Tecnológica de Minérios. In: CETEM **Tratamento de Minérios**. 4^a ed. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. Cap. 3, p. 55 a 109.

NGUYEN, AHN; SCHULZE, HANS JOACHIM. **Colloidal Science of Flotation**. [S.l.]: CRC Press, v. 118, 2003.

PARIAN, M. **Development of the mineralogical path for geometallurgical modelling of iron ores**. Luleå: Luleå University of Technology, v. Licentiate Thesis in Mineral Processing, 2015.

PETRUK, W. **Applied Mineralogy in the Mining Industry**. 1^a. ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2000.

PHILANDER, CARLO; ROZENDAAL, ABRAHAM. The application of a novel geometallurgical template model to characterize the Namakwa Sands heavy mineral deposit, West Coast of South Africa. **Minerals Engineering**, Cidade do Cabo, Outubro 2013. 82-94.

PINTO, L. R. **Curso de Pesquisa Operacional Aplicada à Mineração**. Ouro Preto: [s.n.], 2002.

PIRARD, E. **From Geometallurgy to Ecometallurgy - Building Mines for the Future**. Université de Liège - GeMMe. Liège. 2015.

RIBEIRO, C. C. **Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO**. Brasília: Tese(Doutorado em Geologia), v. 508 f, 2008.

SAIKKONEN, R. **Chemical Analysis of rocks and minerals - New analytical methods developed for some major and minor components**. 47 pg. ed. Espoo: University of Helsinki, v. Dissertação Acadêmica, 1996.

SGS Mineral Service. Disponível em:

<<http://www.sgs.com.br/~media/Global/Documents/Flyers%20and%20Leaflets/SGS-MIN-WA243-Process-Mineralogy-EN-11.pdf>>. Acesso em: 19 Maio 2017.

SGS Mineral Services. Disponível em: <<http://www.sgs.com.br/pt-BR/Construction/Services-Related-to-Materials/Materials-Testing/High-Definition-Mineralogy/Process-Mineralogy.aspx>>. Acesso em: 19 Maio 2017.

SGS Mineral Services, set. 2013. Disponível em: <<http://www.sgs.com/en/mining/exploration-services/geometallurgy>>. Acesso em: 23 Maio 2017.

SUAZO, C.J; KRACHT, W; ALRUIZ, O.M. Geometallurgical modelling of the Collahuasi flotation circuit. **Minerals Engineering**, n. 23, p. 137-142, 2010.

SUTHERLAND, D; GOTTLIEB, P. Application of automated quantitative mineralogy in mineral processing. **Minerals Engineering**, Clayton, 13 Fevereiro 2003. 753-762.

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

VIANNA, I. O. D. A. **Metodologia de Trabalho Científico**: Um enfoque didático da produção científica. [S.l.]: EPU, 2001.

VIEIRA, M. C. A. **Metodologia para prever Recuperação de Zinco em Planta de Beneficiamento**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, v. 176 f., 2016.

VIEIRA, MARA; MENDONÇA, A; COSTA, J.F.C.L. Métodos Geoestatísticos aplicados à Modelagem Geometalúrgica. **HOLOS**, 2015. 65-71.

WHITEN, B. Calculation of Mineral Composition from Chemical Assays. **Mineral Processing & Extractive Metallurgy**, Brisbane, 2008. 83-97.

WILLIAMS, S; RICHARDSON, J. Geometallurgical Mapping: A new approach that reduces technical risk. **SGS Mineral Services: Technical Paper**, Janeiro 2004. 1-13.

WILLS, B. A. **Wills' Mineral Processing Technology**: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8^a. ed. [S.l.]: Elsevier, v. I, 2016.

XPS - Expert Process Solutions, 2017. Disponível em: <<https://xps.ca/services/process-mineralogy>>. Acesso em: 2 Julho 2017.