

## APLICAÇÃO DE CLASSIFICAÇÃO GEOMETALÚRGICA PARA AS CÂMARAS DE LAVRA DA MINA DE MORRO AGUDO – PARACATU/MG\*

*Eder Lúcio de Castro Martins<sup>1</sup>  
Jorge Lucas Carvalho Bechir<sup>2</sup>  
Lucas Monteiro Corrêa e Lopes<sup>3</sup>  
Valerio Metsavaht<sup>4</sup>  
Camilo José de Freitas Neto<sup>5</sup>*

### Resumo

A Mina de Morro Agudo da Votorantim Metais está localizada na cidade de Paracatu (MG). A mina compreende um depósito de zinco e chumbo e atualmente o método de lavra empregado é o de Câmara e Pilares. O estudo geometalúrgico empregado na unidade tem por objetivo avaliar a performance das câmaras de lavra submetidas a testes de bancada correlacionando características mineralógicas com as etapas de beneficiamento. O minério é constituído predominantemente pelos minerais minério esfalerita (ZnS) e galena (PbS). O trabalho vem sendo desenvolvido com amostras de testemunhos de sondagem e representam as câmaras de lavra dos diversos níveis e regiões da Mina. Além dos testes de bancada que compreendem etapas de moagem, granuloquímica e flotação, as amostras são submetidas às análises químicas e mineralógicas. Foram determinados estatisticamente as classes de teores de alimentação dos testes, com o objetivo de realizar comparações de indivíduos que pertencem à mesma população. As câmaras de lavra são classificadas pelo rendimento geometalúrgico de acordo com a performance da variável recuperação metálica. De acordo com os resultados dos testes em bancada e sua respectiva classificação geometalúrgica, é possível traçar estratégias para que o planejamento de lavras e a usina de beneficiamento possam trabalhar em sinergia, de forma a maximizar o valor econômico de determinada frente de lavra.

**Palavras-chave:** Geometalurgia; Zinco; Chumbo; Variabilidade.

### GEOMETALLURGICAL CLASSIFICATION OF THE SULPHIDE ORE FROM MORRO AGUDO MINE

#### Abstract

Morro Agudo mine located in Paracatu, Northwest Minas Gerais state. The mine comprises a zinc and lead deposit, currently mined in underground fashion by rooms and pillars method. The goal of the geometalurgical study, is to evaluate mining rooms performance by means of correlating bench testing to mineralogical characteristics with an optimization approach. The sulphide ore consists mainly by mineral ore sphalerite (ZnS) and galena (PbS). Samples are taken from drill cores and represent a universe from different levels and sites of the mine. In addition to the test bench composed grinding steps, chemistry analysis by fraction and flotation, the samples are submitted to chemical and mineralogical characterization. It was possible to establish statistically population groups according to feeding grade, in order to carry out comparisons of samples belonging to the same population. Mining rooms are classified hereby as a function of the variable: metal recovery. From bench testes results, one can drop into conclusions regarding geometalurgical classification in order to optimize mine planning and recovery plant, achieving and integrated perspective of maximum benefit.

**Keywords:** Geometallurgy; Zinc; Lead; Variability.

<sup>1</sup> *Engenheiro Metalurgista, Gerente de Tecnologia, Tecnologia Polimetálicos, Votorantim Metais, Vazante, Minas Gerais, Brasil.*

<sup>2</sup> *Eng. de Minas, Eng. Pleno, Tecnologia Polimetálicos, Votorantim Metais, Vazante, MG, Brasil.*

<sup>3</sup> *Eng. de Minas, Eng. Junior, Tecnologia Polimetálicos, Votorantim Metais, Paracatu, MG, Brasil.*

<sup>4</sup> *Eng. de Minas, Consultor de Engenharia, Tecnologia Polimetálicos, Votorantim Metais, Vazante, MG, Brasil.*

<sup>5</sup> *Geólogo, Geólogo Junior, Tecnologia Polimetálicos, Votorantim Metais, Vazante, MG, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

O depósito de Zn-Pb de Morro Agudo compreende corpos sulfetados stratabound concordantes, além de remobilizações não-concordantes, em dolarenitos e brechas intraformacionais da formação Morro do Calcário, Grupo Vazante. A zona mineralizada orienta-se a N15°E na porção norte da jazida e tende a N70°E na porção sul, mergulhando 20°N. Os corpos mineralizados, devido a continuidade estratigráfica, permitiram aos geólogos da mina identificar oito estratos mineralizados nomeados de G a N da base para o topo. A mina de Morro Agudo é regionalizada devido às falhas geológicas que dividem o depósito em Bloco A, B, C, D e E [1].

A escassez de minérios de altos teores e a tendência de minérios cada vez mais pobres e complexos, tem possibilitado o desenvolvimento de tecnologias capazes de processar esses materiais objetivando atingir as especificações de qualidade dos produtos. Paralelamente a esta realidade enfrentada pelo mercado minerador, é necessário desenvolver alternativas que minimizem o custo de produção e otimizem o processo produtivo além de possibilitar a competitividade das empresas. Dessa forma torna-se cada vez mais importante o conhecimento profundo dos depósitos minerais e sua resposta ao processo de beneficiamento, sendo possível operar com previsibilidade e minimizar variações do processo.

Em um depósito mineral, além da variação de teor, existem inúmeros outros parâmetros que impactam diretamente no rendimento final de um empreendimento. Exemplos destes parâmetros são variação de dureza, mineralogia, grau de liberação do mineral minério, porosidade, entre outros [2]. Neste cenário o estudo geometalúrgico dos depósitos minerais tem se mostrado uma aliança importante no entendimento do comportamento de diferentes tipologias de minério de uma mesma mina no processo de beneficiamento.

A geometalurgia aplicada à Mina de Morro Agudo compreendem estudos de moagem, granuloquímica, flotação de bancada e caracterizações mineralógicas. O conjunto dessas informações permite identificar as melhores tecnologias de concentração dos minerais de interesse, quebrando paradigmas operacionais além de apoiar a estabilidade dos processos [2]. A correlação entre as caracterizações mineralógicas e os resultados obtidos nos testes de bancada possibilitam a classificação geometalúrgica das câmaras de lavra da mina de acordo com parâmetros de processo (recuperação, teor de concentrado, etc.), o que permite aumentar a previsibilidade nas etapas de beneficiamento do minério das diversas regiões da mina.

O objetivo deste trabalho é demonstrar como a classificação geometalúrgica das câmaras de lavra da Mina de Morro Agudo permite aumentar o conhecimento do comportamento geometalúrgico do minério, contribuindo para o aumento de eficiência e estabilidade do processo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O minério de Zn e Pb de Morro Agudo é essencialmente sulfetado, sendo raras as ocorrências de outras fontes minerais desses elementos. Dessa forma, as etapas de tratamento compreendem britagem em três estágios, moagem, classificação via hidrociclones e flotação, produzindo um concentrado de chumbo sulfetado e outro de zinco sulfetado [3]. Os concentrados devem atingir teores da ordem de 55% de Pb no concentrado de chumbo e 37,5% de Zn no concentrado de zinco. Um ponto relevante é que no processo industrial de beneficiamento de Morro Agudo não há geração de resíduos. Isto se deve ao fato de que o rejeito do processo consiste de um calcário, o

qual é comercializado e tem sua aplicação na agricultura como corretor de acidez de solo.

Os estudos de geometurgia em Morro Agudo tiveram seu início em 2014 e, desde então, reuniões são realizadas com participação das áreas de Tecnologia, Geologia, Lavra e Beneficiamento, onde se pode discutir os resultados dos testes, o planejamento de lavra, bem como os desafios e estratégias no beneficiamento. O trabalho se inicia com a disponibilização do sequenciamento de lavra de médio e longo prazo das câmaras de lavra que são previstas para alimentarem a usina de beneficiamento. Dessa maneira é possível a separação e composição das amostras de furo de sonda representativas da câmaras e frentes de lavra. Cada amostra composta que seguem para os testes em bancada possuem cerca de 1,3kg. Segue-se, então, o estudo com os testes de moagem, granulométrica e flotação. É importante ressaltar que os testes são padronizados, cujo objetivo é gerar o efeito comparativo, facilitando assim a interpretação dos resultados.

Aproximadamente 50 parâmetros são obtidos em cada teste de bancada, tais como: distribuição dos elementos de interesse em diversas faixas granulométricas, teor de concentrado, grau de enriquecimento, recuperação mássica e metalúrgica, tempo de moagem, F80 e P80, teor de minerais de ganga, entre outros. Todas as amostras geradas nos testes são enviadas para caracterização mineralógica, por meio de software de análise de imagem automatizada (Mineral Liberation Analyzer) acoplado a um microscópio eletrônico de varredura, das quais se pode relacionar a mineralogia com o desempenho dos testes. Todos os resultados alimentam um banco de dados, a partir do qual é realizado um tratamento estatístico é realizado com o objetivo de interpretação dos dados.

Através da tratativa estatística dos dados foi possível criar uma classificação geometúrgica para os seguintes parâmetros: recuperação metalúrgica, teor de concentrado da flotação rougher e grau de enriquecimento. Tal classificação permite uma rápida interpretação da performance geometúrgica de determinada frente de lavra por parte da operação de mina e usina.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 MOAGEM E GRANULOQUÍMICA**

O teste padrão de moagem permite identificar frentes de lavra com maior ou menor facilidade de moer. De acordo com a granulometria da alimentação e produto do moinho, é possível determinar o F80 e o P80. O gráfico 1 apresenta as curvas de distribuição granulométrica da alimentação e do produto da moagem da frente de lavra 470RJKE.

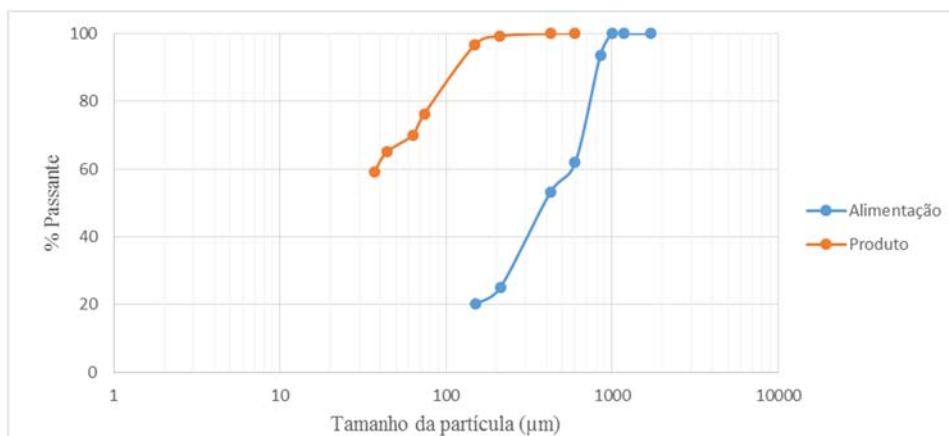


Gráfico 1 - Distribuição granulométrica da alimentação e do produto do teste de moagem

Os testes de granuloquímica permitiram identificar em quais frações granulométricas os elementos de interesse se concentram. O gráfico 2 demonstra a % em massa do Zn e do Pb nas diversas malhas granulométricas do produto da moagem. Se conclui que os dois elementos se concentram nas frações ultrafinas, menores que 0,037mm (400#).

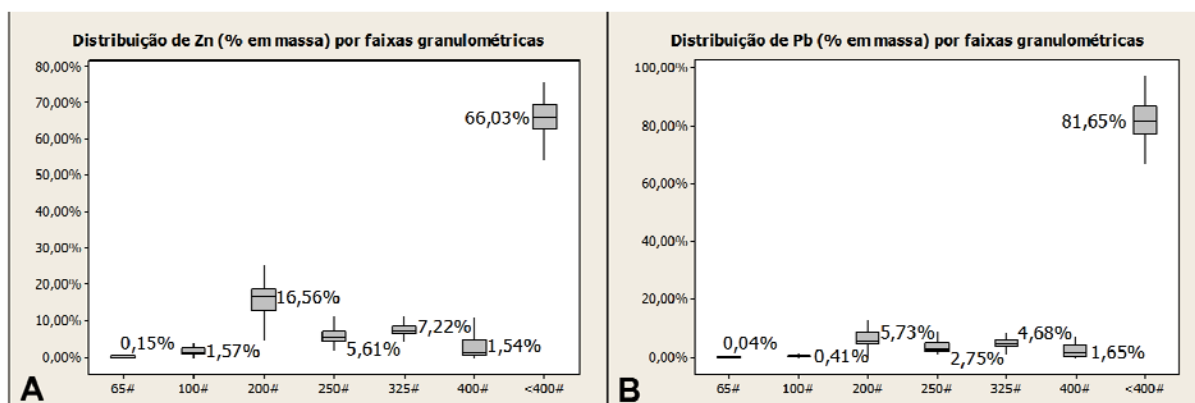


Gráfico 2 - Distribuição dos Elementos (% em massa) por Faixas Granulométricas (\*os valores apresentados no gráficos correspondem as medianas)

Uma constatação importante verificada com os testes de granuloquímica foi a associação entre o Zn e Cd. De acordo com o gráfico 3, que apresenta os teores de Zn e Cd em diferentes malhas, se pode observar o comportamento idêntico destes dois elementos. Através da caracterização mineralógica foi possível confirmar a associação, o Cd está na estrutura química da esfarelita (ZnS). Essa evidência tem grande importância para a operação da planta, pois como o rejeito do processo é comercializado como calcário para uso na agricultura, o teor de Cd deve ter estritamente controlado, não podendo ultrapassar limites estabelecidos pelo Ministério da Agricultura e Pecuária. A fim de se conhecer melhor essa associação, foi feito um levantamento da relação entre e o teor de Cd e o teor de Zn por região da mina. O gráfico 4 apresenta essa relação, antes aceita como constante e com o estudo geometalúrgico foi possível provar a variabilidade.

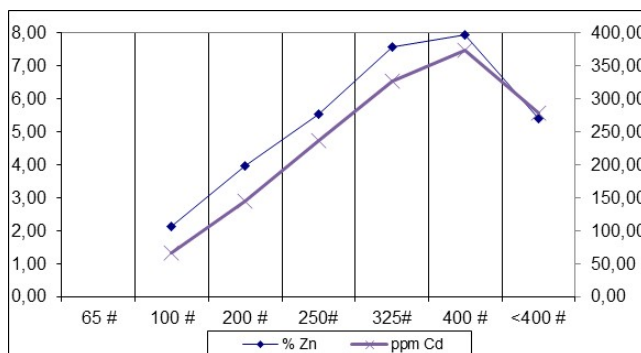


Gráfico 3 - Teores de Zn e Cd em diversas malhas granulométricas.

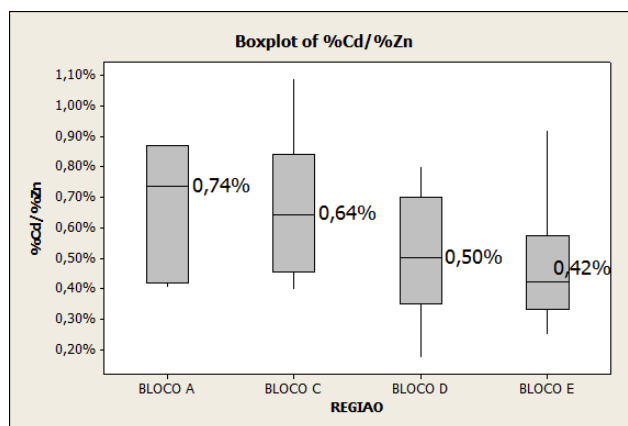


Gráfico 4 - Razão entre teor de Cd e Zn por região da mina.

Através destes dados foi possível atingir uma operação mais estável, uma vez que é possível se trabalhar tendo um controle melhor da recuperação metalúrgica de Zn quando o teor de Cd está mais elevado na alimentação da planta.

### 3.2 FLOTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOMETALÚRGICA

Os testes de flotação foram capazes de determinar as variações de rendimento na etapa de concentração das diferentes regiões da mina de Morro Agudo. Através dessas constatações é possível prever o comportamento das frentes de lavras das diversas regiões da mina além de avaliar a variabilidade de uma série de parâmetros, como teor de concentrado, grau de enriquecimento, consumo de reagentes, por exemplo. Os gráficos 5A e 5B apresentam as variações de recuperação metalúrgica de Zn e Pb por região da mina.

É importante salientar que todos os testes são padronizados (para efeito comparativo) e as amostras são compostas de acordo com o teor de sequenciamento da mina de determinada câmara de lavra, portanto os teores de alimentação dos testes são variados, conforme indica o gráfico 6A e 6B.

Os teores de alimentação de Zn e Pb foram divididos em classes, através de tratamento estatístico, a fim de comparar os resultados de indivíduos que pertencem a uma mesma população. A determinação das 4 classes de teores de alimentação, conforme tabela 1, foi realizada de acordo com os quartis de cada distribuição.

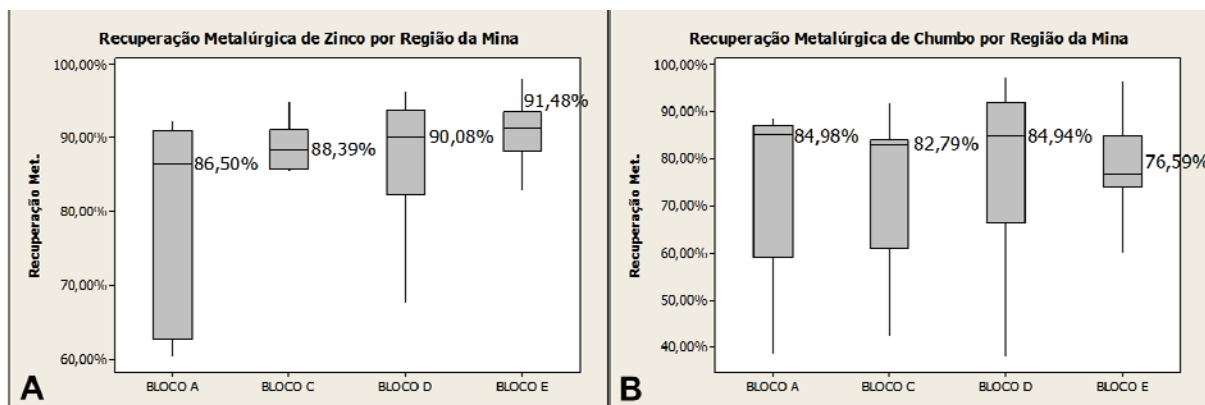


Gráfico 5 - Variabilidade da Recuperação Metalúrgica do zinco (5A) e do chumbo (Pb) nas regiões da Mina de Morro Agudo

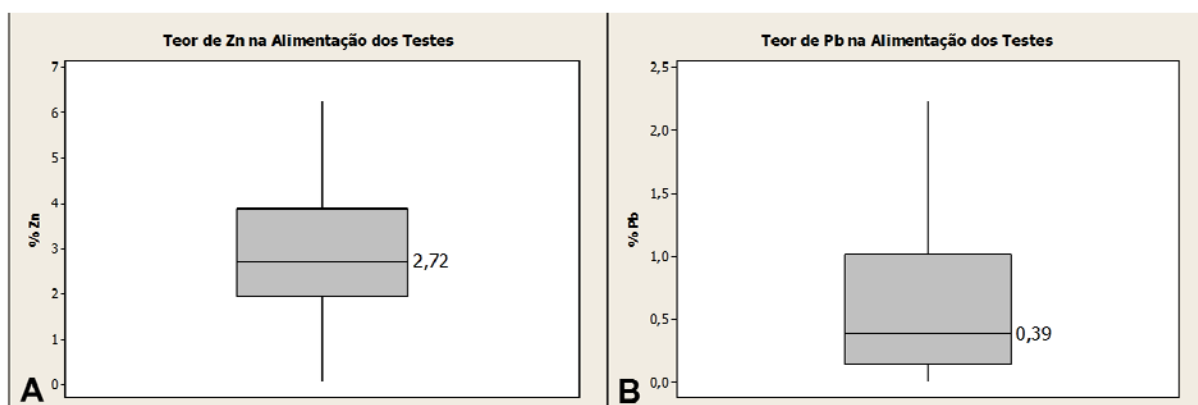


Gráfico 6 - Variação dos teores de zinco (6A) e chumbo (6B) na alimentação dos testes.

Tabela 1 - Classes de teores de alimentação de zinco e chumbo

Classes de Teores de Zn	Classes de Teores de Pb
0,10 a 1,96%	0,02 a 0,15%
1,96 a 2,72%	0,15 a 0,39%
2,72 a 3,89%	0,39 a 1,02%
3,89 a 6,24%	1,02 a 2,24%

Através dessas classes de teores de alimentação dos testes foi possível verificar como as variáveis recuperação metalúrgica, teor de concentrado da flotação rougher e grau de enriquecimento respondem de acordo com a classe à qual pertencem. Os gráficos 7A e 7B ilustram a variação das recuperações metálicas de acordo com as classes de teores de alimentação de zinco e chumbo, respectivamente.

Para avaliar a performance do teste de bancada foi proposta uma classificação geometalúrgica que fornece, de forma rápida, informações de recuperação metalúrgica (RM), teor de concentrado (TCR) e grau de enriquecimento (GE) de determinada frente de lavra. Essas informações ficam disponíveis para toda a unidade em planilhas eletrônicas. A classificação geometalúrgica é identificada por letras e o significado é apresentado na tabela 2.

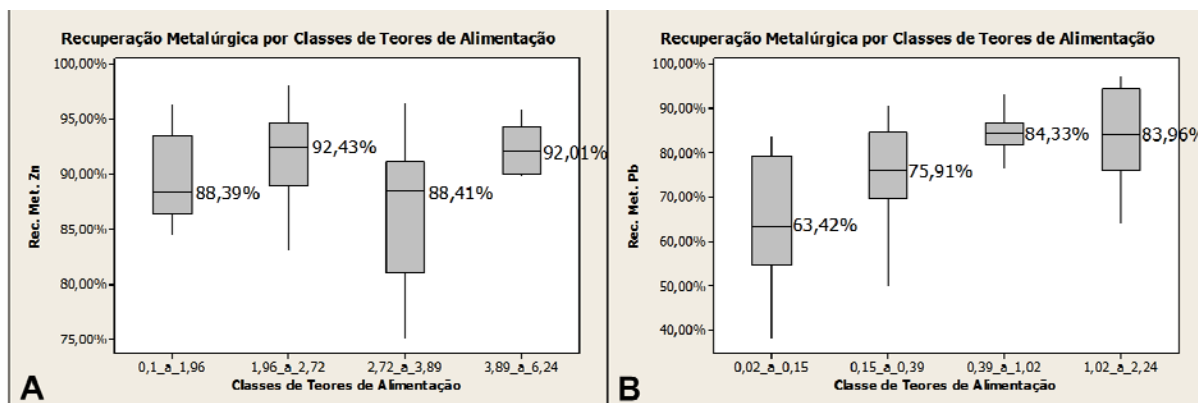


Gráfico 7 - Variabilidade da Recuperação Metalúrgica do zinco (7A) e do chumbo (7B) de acordo com a classe de teor de alimentação.

Tabela 2 - Identificação da classificação geometalúrgica de acordo com a performance do teste de flotação.

Rendimento	Classificação
Ótima Performance	A
Boa Performance	B
Performance Ruim	C
Performance Muito Ruim	D

### 3.3 APLICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO GEOMETALÚRGICA

Como dito anteriormente a classificação geometalúrgica tem como objetivo a interpretação fácil e rápida da performance em testes de moagem e flotação de bancada de uma frente de lavra. A tabela 3 apresenta os resultados dos testes de bancada da frente de lavra 470RJKE localizada no Bloco E.

Tabela 3 - Resultados dos testes de flotação da frente de lavra 470RJKE

<i>Região da Mina</i>	Bloco E
<i>Frente de Lavra</i>	470RJKE
<i>Teor de Zn na Alimentação</i>	2,19%
<i>Recuperação Metalúrgica de Zn</i>	95,80%
<i>Teor de Zn no Concentrado Rougher</i>	16,25%
<i>Grau de Enriquecimento de Zn</i>	7,42
<i>Teor de Pb na Alimentação</i>	1,92%
<i>Recuperação Metalúrgica de Pb</i>	85,34%
<i>Teor de Pb no Concentrado Rougher</i>	27,61%
<i>Grau de Enriquecimento de Pb</i>	14,38

Com os resultados obtidos e apresentados na tabela 3 é possível classificar geometalúrgicamente a frente de lavra. Primeiramente deve-se estabelecer a qual classe de teores de alimentação de Zn e Pb a frente de lavra pertence. Essa determinação é necessária para que a comparação dos resultados seja feita de acordo com indivíduos que pertencem à mesma classe, evitando-se comparar frentes de lavra com teores de alimentação muito distintos.

Atualmente se classificam as câmaras de lavra de acordo com três variáveis. A tabela 4 exemplifica a classificação geometalúrgica da frente de lavra citada anteriormente.

Pela classificação geometalúrgica apresentada na tabela 4, Pode-se concluir que para o circuito de flotação de zinco a performance foi excelente para todas as variáveis analisadas. Já para o circuito de chumbo, o teor de concentrado da flotação rougher apresentou uma performance ruim, embora a recuperação metalúrgica e grau de enriquecimento tenham apresentado ótimos resultados.

Tabela 4 - Classificação geometalúrgica da frente de lavra 470RJKE.

Tabela de Resultados - Classificação Geometalúrgica												
Blocos	Alimentação - Geomet				Zinco			Chumbo			Tempo de moagem	% Retido acum - 325#
	Zn	Pb	Classe Zn	Classe Pb	RM	TCR	GDE	RM	TCP	GDE		
470RJKE	2,19	0,41			95,80	16,25	7,42	93,17	7,31	17,82	48min	65,17
	Classif Geometalúrgica		3	4	A	A	A	A	C	B		
	Classif Global				4	3	4	4	3	4		

Essa classificação fornece informações que são utilizadas desde o planejamento de lavra até a operação da usina, permitindo traçarem as estratégias de produção. Blends ótimos de frente de lavra, dosagem de reagentes, nível de células de flotação entre outras, são variáveis que podem ser controladas de acordo com as informações que o estudo geometalúrgico proporciona. Todas as frentes de lavra ensaiadas são classificadas e os resultados apresentados e discutidos em reuniões entre as áreas operacionais da Unidade de Morro Agudo. Os resultados dos testes correlacionados com as caracterizações mineralógicas tem possibilitado um leque de informações que apoiam projetos de tecnologia, otimizando de forma contínua as operações unitárias da unidade.

#### 4 CONCLUSÃO

O estudo geometalúrgico aplicado na Mina de Morro Agudo tem possibilitado determinar a variabilidade do minério sulfetado de Zn e Pb nas etapas de beneficiamento por região da mina. Os resultados obtidos têm sido base para tomadas de decisões, contribuindo para a estabilidade operacional e agregando conhecimento técnico para todas as áreas envolvidas no trabalho. A classificação geometalúrgica tem se mostrado uma ferramenta importante, capaz de prever a performance das frentes de lavras nas etapas de moagem e flotação. Além de ter acesso fácil e rápido, a planilha de classificação geometalúrgica fornece informações valiosas de forma objetiva e de interpretação simples.

Além das vantagens citadas acima, o estudo tem identificado oportunidades de melhoria e ajudado no desenvolvimento de tecnologias capazes de otimizar o processo em busca de melhoria contínua da qualidade e quantidade dos produtos.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Neves LP. 2011. CARACTERÍSTICAS DESCRITIVAS E GENÉTICAS DO DEPÓSITO DE Zn-Pb MORRO AGUDO, GRUPO VAZANTE. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Brasília.
- 2 Lemos MG, Bechir JLC, Lopes LMC, Souza AD, Bhering AP, Martins ELC et al. 2015. GEOMETALURGIA – INTEGRANDO MINA E BENEFICIAMENTO PARA AUMENTO DE PRODUTIVIDADE – VAZANTE, MG.
- 3 Votorantim Metais Unidade Morro Agudo, 2008. Book Beneficiamento/Processos. Relatório Interno.