

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas –
Mestrado Profissional

Danilo de Oliveira Correa Crego

**O TEOR DE CORTE COMO UM OUTPUT DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO
PARA OTIMIZAR A GERAÇÃO DE VALOR. UM ESTUDO DE CASO**

Belo Horizonte
2023

Danilo de Oliveira Correa Crego

**O TEOR DE CORTE COMO UM OUTPUT DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO
PARA OTIMIZAR A GERAÇÃO DE VALOR. UM ESTUDO DE CASO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Orientador: Dr. Michel Melo Oliveira

Belo Horizonte

2023

C913t Crego, Danilo de Oliveira Correa.
O teor de corte como um output do planejamento estratégico para otimizar a geração de valor [recurso eletrônico] : um estudo de caso / Danilo de Oliveira Correa Crego. - 2023.
1 recurso eletrônico (54 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Michel Melo Oliveira.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 53-54.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Mineração - Teses. 4. Planejamento estratégico - Teses. 5. Lavra de minas - Teses. 6. Metais - Corte - Teses. 7. Custo - Teses. 8. Minas - Teses 9. Rochas - Teses. 10. Minérios de ferro - Teses. I. Oliveira, Michel Melo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional


UF **m** G

O TEOR DE CORTE COMO UM OUTPUT DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO PARA OTIMIZAR A GERAÇÃO DE VALOR. UM ESTUDO DE CASO

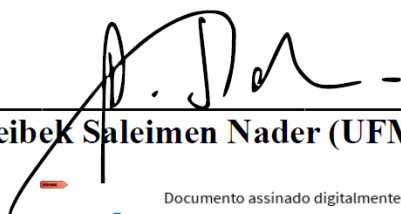
DANILO DE OLIVEIRA CORRÊA CREGO

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.


Aprovada em 13 de julho de 2023 pela seguinte banca:

 Documento assinado digitalmente
MICHEL MELO OLIVEIRA
Data: 13/07/2023 17:16:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Michel Melo Oliveira (UFMG)
Orientador



Prof. Dr. Alizeibek Saleimen Nader (UFMG)

 Documento assinado digitalmente
PEDRO BENEDITO CASAGRANDE
Data: 13/07/2023 17:20:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Pedro Benedito Casagrande (UFMG)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Dr. Michel Melo Oliveira, por compreender os diversos contratempos ao longo dos últimos dois anos e seguir disposto a me orientar sempre que necessário. À Sandfire Matsa, por permitir a utilização de dados que validam e suportam esse trabalho e pelo apoio da Gerência de Planejamento de Longo Prazo na pessoa do engenheiro Fabian Silva Araque, pelo suporte e incentivo para a condução desse trabalho. À minha esposa, Ludmila Gonçalves Crego, por me incentivar a crescer e evoluir, e aos meus pais e irmãos, por todo o suporte incondicional.

RESUMO

O teor de corte, apesar de ser tratado em muitas situações como apenas uma trivialidade do processo de planejamento estratégico de uma mina, é um elemento de enorme importância quando se observa uma operação ou um projeto sob um ponto de vista de geração ou maximização da geração de valor, pois ele carrega em si, em última instância, o poder de classificar um volume de rochas em estéril ou minério. Tradicionalmente, a partir de uma série de parâmetros e premissas de custos, teores de corte são calculados ou modelados e, então, utilizados para delimitar corpos minerais para os quais desenhos e sequências de extração são desenvolvidos considerando as restrições de lavra, processamento e produtividades. Através dessa abordagem tradicional, o teor de corte é parte de um conjunto de entradas ou *inputs* que culminam no chamado plano estratégico. Esse trabalho defende a proposta de que o teor de corte deve ser tratado como um fator de saída ou um *output* do planejamento estratégico e que está sob controle da empresa na definição de sua estratégia corporativa. Para tanto, propõe a realização de uma análise de caso em uma operação real, em que compara a geração de valor ao utilizar a abordagem tradicional – calculada pelo método de Valor Presente Líquido (VPL) por fluxos de caixa descontados – com o valor gerado utilizando a otimização dos teores de corte para maximização do VPL.

Palavras-chave: teor de corte; VPL; NSR; maximização de valor; otimização de teores de corte; análise determinística; análise otimizada; planejamento de mina; planejamento estratégico; *hill of value*.

ABSTRACT

The cut-off grade, although being usually considered to be just another trivial step in the process of strategic planning in a mine, is an element of enormous importance when looking into a real operation or a mine project under a value generation or maximization of value generation point of view, because it carries in itself the power of classifying a volume of rock as ore or waste. Traditionally, from a series of cost parameters and assumptions cut-off grades are estimated or modelled and such grades are then used to delineate orebodies for which designs, and extraction sequences are developed considering mining, processing, and productivity constraints. Through this classic approach, the cut-off grade is part of a set of entries or inputs that culminate in the strategic plan. This work defends the idea that the cut-off level should be treated as an output factor of the strategic planning and as such it is under the control of the company in the definition of its corporate strategy. In order to support the idea, it proposes a case study using real operation data in which it compares the generation of value using the traditional approach – calculated by the method of Net Present Value (NPV) by discounted cash flows – with the generation of value when using the optimization of cut-off value to maximize the NPV.

Keywords: cut-off grade; NPV; NSR; maximizing value; cut-off optimization; deterministic analysis; optimized analysis; mine planning; strategic planning; hill of value.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Variação no valor com mudanças no teor de corte. | 14 |
| Figura 2.1 – Gráfico tipo <i>Hill of Value</i> | 20 |
| Figura 2.2 – Zona em fase de projeto (ZFP). | 23 |
| Figura 2.3 – Zona em fase <i>Opex</i> (ZFO). | 23 |
| Figura 2.4 – Zona em fase Lavra (ZFL)..... | 24 |
| Figura 2.5 – Estrutura de custos utilizada como referência para cálculo do teor de corte. | 25 |
| Figura 2.6 – Ilustração geral das três possíveis condições encontradas na mina. | 27 |
| Figura 2.7 – Resultados de Exploração, Recursos Minerais e Reservas Minerais. .. | 29 |
| Figura 3.1 – Evolução da geração de <i>stopes</i> em uma zona em função da variação do teor de corte. | 32 |
| Figura 3.2 – Diagrama ilustrativo do método de definição de teores de corte pela abordagem otimizada..... | 33 |
| Figura 4.1 – Otimização de COV para zona ACT..... | 35 |
| Figura 4.2 – Otimização de COV para zona AEW..... | 36 |
| Figura 4.3 – Otimização de COV para zona AEX..... | 37 |
| Figura 4.4 – Otimização de COV para zona AOM..... | 38 |
| Figura 4.5 – Resultados de fluxos de caixa para os cenários de COV NSR = 20\$/t, \$80/t e \$140/t. | 39 |
| Figura 4.6 – Sequência isolada de <i>stopes</i> selecionados pelo critério da abordagem tradicional e cenário selecionado através da abordagem otimizada para zona ACT 40 | |
| Figura 4.7 – Sequência isolada de <i>stopes</i> selecionados pelo critério da abordagem tradicional e cenário selecionado através da abordagem otimizada para zona AEW. | 41 |
| Figura 4.8 – Sequência isolada de <i>stopes</i> selecionados pelo critério da abordagem tradicional e cenário selecionado através da abordagem otimizada para zona AEX. | 42 |
| Figura 4.9 – Comparação de NSR por ano entre planos otimizado e tradicional. | 43 |
| Figura 4.10 – Sequência isolada de <i>stopes</i> selecionados pelo critério da abordagem tradicional e cenário selecionado através da abordagem otimizada para zona AOM. | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.11 – Comparação entre planos segundo abordagem tradicional e abordagem otimizada..... | 45 |
| Figura 4.12 – Comparação entre planos segundo abordagem tradicional e abordagem otimizada, excluída a zona AEX..... | 46 |
| Figura 4.13 – Comparação entre planos segundo abordagem tradicional e abordagem otimizada, apenas zona AEX. | 47 |
| Figura 4.14 – Perfil de Produção – Zona AEX limitada e ilimitada – Abordagem Tradicional..... | 48 |
| Figura 4.15 – Perfil de Produção – Zona AEX limitada e ilimitada – Abordagem Otimizada | 49 |
| Figura 4.16 – Comparação entre planos segundo abordagem tradicional e abordagem otimizada como limite de produção anual para zona AEX. | 49 |
| Figura 5.1 – Importância da forma da curva de valor. | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Cálculos de teores de corte segundo abordagem tradicional..... | 26 |
| Tabela 2.2 – Teores de corte definidos para plano estratégico segundo abordagem tradicional..... | 26 |
| Tabela 4.1 – Seleção de cenário de maior valor para cada zona da mina..... | 45 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEC – *Breakeven cut-off*

CAPEX – *Capital Expenditures*

CBRR – Comissão Brasileira de Recursos e Reservas

COG – *Cut-off grade*

COV – *Cut-off value*

CRIRSCO – *Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards*

FCV – *Full cut-off*

JORC – *Joint Ore Reserve Committee*

LOM – *Life of Mine*

NPV – *Net Present Value*

NSR – *Net Smelter Return*

OPEX – *Operational Expenditures*

VPL – Valor Presente Líquido

ZFL – Zona em Fase de Lavra

ZFO – Zona em Fase Opex

ZFP – Zona em Fase de Projeto

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 16 |
| 2.1 | O TEOR DE CORTE COMO INPUT DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO | 17 |
| 2.2 | O TEOR DE CORTE COMO OUTPUT DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO | 19 |
| 2.3 | NET SMELTER RETURN..... | 21 |
| 2.4 | ABORDAGEM TRADICIONAL SOBRE OS TEORES DE CORTE..... | 22 |
| 2.5 | RECURSOS E RESERVAS..... | 28 |
| 3 | METODOLOGIA | 30 |
| 3.1 | ABORDAGEM OTIMIZADA | 30 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 35 |
| 4.1 | OTIMIZAÇÃO DE COV POR ZONAS..... | 35 |
| 4.1.1 | Zona ACT..... | 35 |
| 4.1.2 | Zona AEW | 36 |
| 4.1.3 | Zona AEX..... | 37 |
| 4.1.4 | Zona AOM..... | 38 |
| 4.2 | COMPARAÇÃO INDIVIDUAL POR ZONAS – ABORDAGEM TRADICIONAL X ABORDAGEM OTIMIZADA..... | 40 |
| 4.2.1 | Zona ACT | 40 |
| 4.2.2 | Zona AEW | 41 |
| 4.2.3 | Zona AEX..... | 42 |
| 4.2.4 | Zona AOM..... | 43 |
| 4.3 | COMPARAÇÃO GLOBAL – ABORDAGEM TRADICIONAL X ABORDAGEM OTIMIZADA | 44 |
| 5 | CONCLUSÃO | 51 |
| 6 | REFERÊNCIAS..... | 53 |

1 INTRODUÇÃO

O teor de corte¹ é, geralmente, definido como a mínima concentração que um produto ou metal deve ter em uma unidade métrica de material antes de que ele seja enviado para a etapa de processamento mineral (RENDU, 2014). Como propôs Lane (1988), “material do corpo mineralizado deveria ser sequenciado como minério se, e apenas se, a decisão de tratá-lo adicionar valor econômico a operação”. O teor de corte (COG) é, portanto, um critério de decisão geralmente utilizado na mineração para diferenciar o minério de um material estéril. Como tal, é, possivelmente, o parâmetro de maior impacto e importância em todos e quaisquer aspectos de um projeto mineral ou de uma operação mineira, pois carrega em si a definição das quantidades de material a serem explorados, processados e vendidos. Em última instância, o COG define qual é o valor de um projeto mineral ou de uma operação mineira ao impactar os fluxos de caixa ao longo da vida do ativo.

A determinação do COG é, tradicionalmente, uma das principais etapas do planejamento estratégico. Normalmente, a seleção de teores de corte e o planejamento estratégico são realizados de forma sequencial, ou seja: o valor de corte é inicialmente definido a partir de uma base de dados de custos e avaliações econômicas e, em seguida, com base nessa definição prévia, o desenho de mina e o planejamento de longo prazo são realizados.

O grande problema relacionado à definição dos teores de cortes está precisamente relacionado ao entendimento dos fatores econômicos que influenciam o processo de extração mineral. Dentre eles, estão as variações de oferta e demanda impostas pelos mercados consumidores, que são as principais responsáveis pela variação dos preços de venda dos produtos, e os custos, que têm relação direta com as restrições de capacidade (geometria do corpo mineral, condições geotécnicas, capacidades de transporte, capacidade de processamento, requisitos de ventilação, métodos de lavra, leis e regulamentos de saúde e segurança e outras restrições que limitam a produção de um realce, de uma seção da mina ou da mina como um todo) (RENDU, 2014). Além disso, muitas das decisões tomadas em uma mina subterrânea são intensivas em capital e têm um tempo significativo de implementação. Nesses ambientes, as restrições de capacidade têm um efeito relevante nos teores de corte.

¹ Do inglês *cut-off grade* (COG).

Sendo assim, um COG ótimo seria aquele que, dadas as condições de custo e receitas, resultaria na maior geração de valor pela empresa, ou seja, na maximização do lucro. Atualmente, a determinação do COG através do método de fluxos de caixas descontados é o padrão da indústria mineral mundial e nos círculos acadêmicos. Com esse método, busca-se definir o teor de *breakeven*, ponto no qual a receita total gerada pelo depósito se iguala aos custos totais associados a geração daquela receita. No presente trabalho, o termo *breakeven* será utilizado genericamente para descrever um método de cálculo utilizado para alcançar o COG *breakeven*.

Dado que os preços futuros dos produtos minerais são, por definição, desconhecidos, ou seja, que há uma distribuição de possibilidades de preços possíveis e, ainda, que há uma extensa lista de restrições sob as quais se desenvolve uma operação de extração, a definição do teor de corte pela abordagem *breakeven* possivelmente não está alinhada ao objetivo estratégico da maioria das empresas, que é o de gerar valor de longo prazo e sustentável aos seus acionistas. Isso se dá principalmente pelos erros associados aos cálculos. Poniewierski e Hall (2016) apresentaram um caso real em que um erro da ordem de \$5/t na definição do COG (que pode ser um erro na base de custos, na definição das receitas ou ambos) fez com que 55% das reservas de uma mina tivessem efetivamente valor zero. Além disso, em minas subterrâneas e/ou de teor de corte incremental, devido às inúmeras condições restritivas e de capacidades, há situações em que material de baixo teor pode ser processado e ainda resultar em geração de valor.

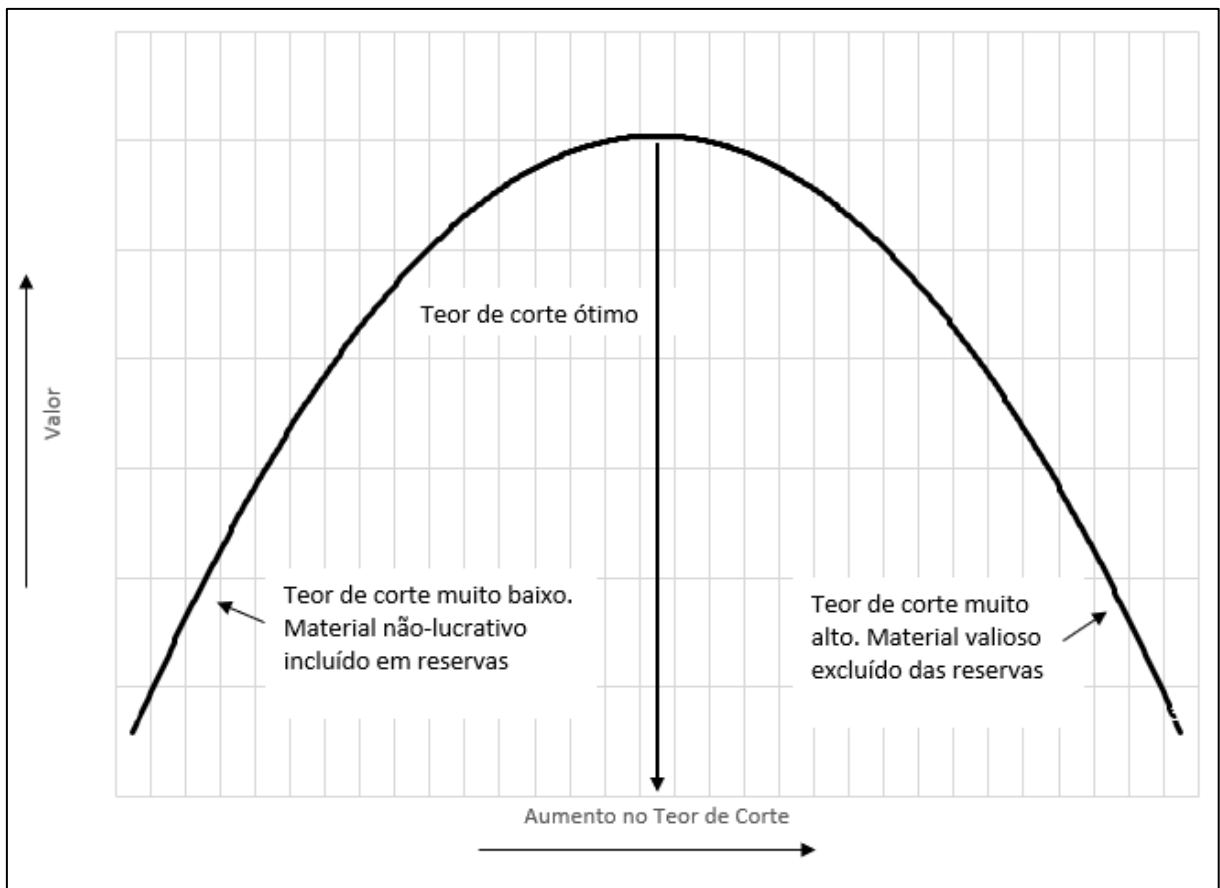
Conforme comentado inicialmente, a prática padrão da indústria mineral mundial consiste na definição do COG a partir de uma série de premissas de preços e custos e, após a determinação desse valor, se desenvolvem os desenhos e planos estratégicos de longo prazo para a vida do ativo mineral (LOM²) (HALL, 2014). Sendo assim, a maior parte da literatura acadêmica se desenvolveu nesse sentido: desenvolvimento de ferramentas para a definição do teor de corte a ser usado como valor de entrada – ou *input* – para o planejamento estratégico. Essa visão do COG determinístico como valor de entrada para o planejamento estratégico é, provavelmente, um grande limitador na busca pelo objetivo estratégico da maioria das empresas, que é o de maximizar a geração de valor aos seus acionistas, pois não permite avaliar o impacto das variações dos parâmetros no resultado econômico e

² Do inglês *life of mine* (LOM).

financeiro da operação ou do projeto mineiro e, em consequência, mitigar ou reduzir os impactos dos erros nas bases de cálculo.

Em contraste a essa visão determinística dos COG, Poniewierski e Hall (2016) argumentam que o único método verdadeiro para avaliação de um COG *breakeven* é conduzir uma série de cenários com valores de teores de corte e taxas de produção variados. Se esses cenários forem avaliados em um modelo financeiro que reflita com precisão os custos de cada cenário e os fluxos de caixa não-descontados forem dispostos em um gráfico conforme mostrado na Figura 1.1, o COG que resulta na maior geração de valor deveria ser o COG *breakeven* verdadeiro.

Figura 1.1 – Variação no valor com mudanças no teor de corte.



Fonte: HALL, 2014 apud PONIEWIERSKI e HALL, 2016. Tradução livre pelo autor.

O desenvolvimento das ferramentas de planejamento estratégico e da velocidade de processamento de dados nos permite, hoje, desenvolver múltiplos cenários nos quais podemos, em teoria, variar quaisquer premissas originalmente definidas e avaliar o seu impacto na geração de valor por uma operação ou projeto mineral. Além disso, a grande vantagem de comparar múltiplos cenários é de que,

mantidas as demais premissas, pode-se avaliar a diferença de geração de valor relativa entre cenários para a variável em análise com muita precisão, ainda que o valor absoluto dos fluxos de caixa possa apresentar alguma imprecisão devido a própria natureza dos dados, e, com isso, é possível definir uma curva de possíveis valores presentes líquidos (VPL) para uma operação ou um projeto mineral, sob uma visão mais estocástica do planejamento estratégico.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma análise de caso no qual se compara o resultado financeiro (calculado pelo método de fluxo de caixa descontado e VPL) de dois planos estratégicos LOM desenvolvidos para a mina de Águas Teñidas, de propriedade da empresa australiana Sandfire Mtsa, localizada na província de Huelva, Espanha. O primeiro plano será resultado da definição do COG, a partir da avaliação tradicional determinística das premissas de preço e custos. O segundo plano será o resultado de maior VPL para uma subsérie de cenários em que o COG é a variável em análise.

Trata-se de um tema de extrema relevância na indústria extrativa, pois é uma mudança de perspectiva em relação à forma em que se definem os teores de corte e sua importância para o alcance das estratégias corporativas em um mundo que migra para operações mais enxutas e com teores médios das jazidas em declínio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A prática padrão na indústria mineral, especialmente para minas subterrâneas, é, primeiro derivar um teor de corte que defina o tamanho e a forma do corpo mineral e, em seguida, desenvolver planos de lavra e extração para o corpo definido. Dado que o teor de corte *breakeven* segue sendo o modelo mais utilizado em muitas operações, derivar o teor de corte *breakeven* significa, na prática, calcular o teor mínimo necessário no minério extraído de uma mina para compensar todos os custos envolvidos na cadeia de extração, processamento e distribuição desse material. Apesar de ser amplamente utilizada na indústria, as análises sob o conceito *breakeven* partem de um modelo de teor de corte muito limitado.

A equação (1) para se determinar o teor, para o qual a receita obtida é igual ao custo para produzir tal receita, é apresentada na sequência:

$$Teor\ Breakeven = \frac{Custo\ (\frac{\$}{t})}{Preço\ do\ produto\ (\frac{\$}{t}) \times Recuperação} \quad \text{(equação 1)}$$

Fatores de conversão podem ser necessários para converter diferentes moedas ou preços nos quais o teor é expresso. Apesar de relativamente simples, muitas empresas gastam quantidades enormes de tempo e energia em discussões sobre quais custos deveriam ser considerados no cálculo e derivando tais custos dos sistemas contábeis corporativos. O conceito de teor de corte *breakeven* foi o ponto de partida para o desenvolvimento da ciência dos teores de corte ao longo do tempo, desde os primeiros trabalhos na década de 1950 até os trabalhos mais recentes, com a incorporação de algoritmos sofisticados aos cálculos.

Os primeiros trabalhos publicados sobre os cálculos dos teores de corte se referem ao controle de teores para minas de ouro na África do Sul no final dos anos 1940 (MORTIMER, 1950), que trazia a necessidade de se considerar a geologia e a natureza da mineralização expressas em toneladas e teores nas relações de teores de corte. No entanto, os trabalhos de Lane (1964; 1988; 2016) sobre a otimização de teores de corte baseada em maximização de valor foram os que mais receberam atenção no universo da mineração mundial. A percepção mais importante utilizada por Lane (1964) em seu trabalho é de que teores de corte mais altos resultam em produção mais rápida. Dado o valor do dinheiro no tempo, a produção presente é mais valiosa do que a produção futura, quando mantidos todos os demais parâmetros

inalterados. Portanto, a teoria tradicional dos teores de corte argumenta que algum estéril pode ser justificado como maximizador do lucro se ele é capaz de produzir um adiantamento da produção no tempo.

Esse conceito, identificado por Lane (1964) e muito utilizado atualmente na indústria mineral, é o de custos de oportunidade. Sob esse conceito, uma operação poderia tomar a decisão de reduzir o teor de corte para a inclusão de material marginal (abaixo do teor de corte *breakeven*) de forma a manter o funcionamento da planta de processamento em capacidade plena. Ou seja, em períodos de menor disponibilidade de minério, material marginal poderia ser processado sob a ótica de oportunidade de custos de processamento.

A premissa básica desses trabalhos é de que um método de lavra é assumido e, dados os custos esperados pela lavra por tal método, um teor de corte *breakeven* é derivado. Esse teor é aplicado para delinear os limites do corpo mineral para o qual desenhos de mina e sequências de extração são preparados levando em consideração os limites de processamento especificados. Independentemente da operação, a definição do teor de corte é normalmente apartada dos processos de desenho, planejamento e sequenciamento.

2.1 O TEOR DE CORTE COMO INPUT DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO

A maior parte da literatura relacionada aos teores de corte está direcionada para o desenvolvimento de ferramentas, algoritmos e métodos para incrementar a precisão com a qual os teores de corte são calculados, normalmente como resultado do aumento do número de dados utilizados como entrada, reflexo do aumento da capacidade de coleta e processamento da informação pelas operações ao longo do tempo.

Taylor (1972) utilizou-se da abordagem de Lane (1964) para introduzir um cálculo diferente dos teores de corte de balanço, utilizando parâmetros estatísticos para descrever a distribuição de teores. Dagdelen (1992) discutiu as teorias utilizadas para calcular os teores de corte e ilustrou a diferença entre a abordagem tradicional sobre os teores de corte e técnicas heurísticas através da comparação dos *outputs*. Ele provou que uma técnica com teores de corte decrescentes no tempo maximiza mais o VPL que as técnicas tradicionais e heurísticas. Ele discutiu o conceito de

política de teor de corte ótimo conforme formulado por Lane e formulou um algoritmo utilizado para maximizar o VPL de um projeto. Também Dagdelen (1993) modificou a abordagem de Lane ao introduzir um método analítico ao invés do método gráfico para encontrar os teores de corte de equilíbrio, portanto, simplificando o problema.

Krautkraemer (1988) analisou o efeito de preços estocásticos de metais na seleção de teores de corte e concluiu que as flutuações nos preços dos metais afetam criticamente a seleção de teores de corte.

Whittle e Wharton (1995) apresentaram um novo programa de otimização de teores de corte chamado *Opti-Cut*, capaz de lidar com todas as variáveis que ocorrem em uma operação real, fácil de utilizar e que poderia, potencialmente, incrementar o VPL da maioria das minas a céu aberto e subterrâneas, a partir da otimização dos teores de corte utilizados ao longo da vida de minas nas quais a produção é limitada por algum outro fator que não seja a capacidade da mina.

King (2001) modificou a abordagem de Lane (1964) incorporando variações na produtividade para diferentes tipos de minério, de forma ajustá-la a depósitos polimetálicos.

Ataei e Osanloo (2003) utilizaram um programa de otimização de COG chamado *Multi-Grades*, em que a distribuição de teores com parâmetros econômicos e operacionais é um *input* em cada estágio do desenvolvimento do depósito. Com isso, o programa calcula o teor ótimo para depósitos multimetálicos pelos métodos de teores equivalentes, busca de *grid* iterativo, algoritmo genético e busca *golden section*. Os dados de saída determinam o regime de teores de corte e sequência de produção ótima.

Bascetin e Nieto (2007) propuseram a determinação da estratégia de teores de corte baseada no algoritmo de Lane (1964), com a adição de um fator de otimização baseado no algoritmo GRG (*generalized reduced gradient*) para maximizar o VPL do projeto. O algoritmo GRG foi desenvolvido inicialmente por Ladson *et al.* (1978) e é um procedimento de uma classe de procedimentos chamados métodos *reduced-gradients* ou *gradient projection*, que são baseados em restrições não-lineares. A utilização do algoritmo em um estudo de caso resultou em um aumento equivalente a 5% do VPL.

Thompson e Barr (2014) examinaram o impacto da incerteza dos preços futuros sobre as políticas de teores de corte de minas. Os autores empregam um novo modelo de opções reais para determinar o teor de corte ótimo sob preços estocásticos. A teoria das opções reais argumenta, dentre outras coisas, que a flexibilidade gerencial, como a habilidade de ajustar taxas de produção com as mudanças de preço (otimização de COG) ou de suspender/abandonar a produção, muda a matemática de uma forma que invalida o argumento do valor esperado, sob o qual a abordagem de fluxos de caixa descontados é baseada. Como conclusão, os autores apresentaram dois novos *insights* na definição econômico do minério: o primeiro é o de que, na presença de incertezas de mercado, os teores de corte são mais baixos que aqueles previstos utilizando modelos determinísticos tradicionais e o segundo é o de que, quando os horizontes de avaliação de valor são mais longos, os teores de corte são mais baixos. Esses *insights* têm um impacto significativo na definição dos teores de corte.

Githiria e Musingwini (2018) apresentaram um modelo de otimização de teores de corte estocástico que estende a teoria determinística de Lane para calcular teores de corte ótimos ao longo da vida da mina chamado NPVMining, que incorpora relações toneladas-teores reais e distribuição de preços de *commodities* para contabilizar a incerteza. As melhorias no VPL gerado pelo NPVMining variaram entre 7% e 186%, demonstrando o valor do uso de abordagem estocásticas na otimização dos teores de corte.

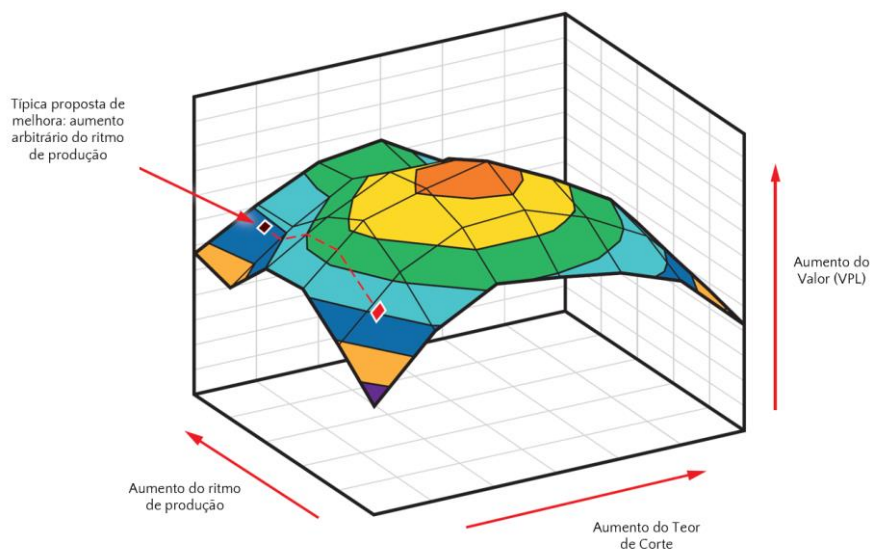
Martinelli *et al.* (2020) apresentaram um modelo MIP (*mixed-integer programming*) para resolução de programas de planejamento de longo prazo em uma mina subterrânea. O modelo, que estabelece a sequência de lavra em um horizonte de 20 anos, determina quais lentes do modelo geológico serão extraídas e em qual ordem, respeitando as restrições operacionais. Para cada lente, um teor de corte específico deve ser selecionado para maximizar o VPL. A seleção de teores de corte a serem usados para cada lente pelo otimizador aumentou o VPL em mais de 20% em média.

2.2 O TEOR DE CORTE COMO OUTPUT DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO

Na parte 2.1, o enfoque foi dado a pesquisas desenvolvidas no sentido de calcular e determinar o teor de corte da forma mais precisa possível. Todas as metodologias citadas partem de um ponto em comum: um método de extração é dado como premissa e, assumida uma série de custos que se aplicam a tal método, os teores de corte são calculados ou modelados. Tais teores são, então, utilizados para delimitar os corpos minerais, para os quais desenhos e sequências de extração são desenvolvidos considerando as restrições de lavra e processamento especificadas.

Hall (2014) questiona o conceito comum de que os teores de corte são intrínsecos a uma operação ou a um corpo mineral, em uma crença de que os teores de corte estão fora do controle das empresas. O autor afirma que o teor de corte é um valor que pode ser selecionado pela companhia. Assim, a decisão do teor de corte é tão importante quanto as decisões relacionadas as taxas de produção, tratamento e sequências de extração. O autor também defende que o processo de otimização da estratégia de lavra pode ser pensado como uma análise multidimensional que contabiliza tudo, ou, pelo menos, tudo que seja importante. Ela busca identificar, simultaneamente, a melhor combinação de teores de corte e parâmetros de decisão estratégicos, de forma a alcançar o objetivo corporativo. Para tanto, introduz o conceito *Hill of Value*, ilustrado como uma superfície 3D que demonstra o comportamento de uma variável dependente (VPL) como uma função de duas variáveis independentes (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Gráfico tipo *Hill of Value*



Fonte: Hall, 2014. Adaptado pelo autor.

Poniewierski, Macsporrán e Shepperd (2003) desenvolveram um modelo simplificado para geração de *stopes* utilizando como base o *software* Microsoft Excel, seguido por um sequenciamento utilizando um programa de sequenciamento heurístico chamado XPAC Autoscheduler para otimização de teores de corte para as minas do complexo Mount Isa, na Austrália, em que geraram mais de duzentos cenários que permitiram compreender o comportamento dos teores de corte para diversos perfis de produção.

Ovalle e Vera (2014) conduziram um exercício de otimização do tipo *Hill of Value* para uma operação com método de lavra do tipo *block cave* e chegaram a um resultado que demonstra que VPL maiores são obtidos utilizando COG acima do valor marginal.

Hocking *et al.* (2020) utilizaram as técnicas de otimização *Hill of Value* para otimizar a performance financeira de uma operação de *sublevel cave* na Austrália e concluem que os melhores retornos financeiros para análises de fluxo de caixa descontados são obtidos com teores de corte acima do marginal.

2.3 NET SMELTER RETURN

A avaliação econômica de um depósito polimetálico se diferencia significativamente da avaliação de um depósito de um único metal. Isso se dá pelo nível de complexidade que há em um depósito desse tipo, nos quais os diversos metais ocorrem em distintas concentrações e quantidades dentro da massa mineral. O modelo *Net Smelter Return* (NSR) é um modelo muito útil na avaliação econômica de depósitos polimetálicos, pois permite a utilização de diferentes parâmetros comerciais e preços para distintos metais contidos em um concentrado mineral.

O NSR representa o valor total dos metais recuperados de cada tonelada de minério menos os custos de fundição aplicáveis (ANNELS, 1991). O cálculo do NSR inclui fatores endógenos e exógenos à empresa. Do lado endógeno, estão as estimativas de teores dos diferentes metais nos concentrados, as recuperações metálicas na planta de processamento mineral e as premissas de preços de venda aplicados a cada um dos metais de interesse comercial. Na parte exógena, estão os parâmetros comerciais regidos pelos contratos entre mina e empresas de fundição, que incluem as recuperações metalúrgicas dos metais, os custos de transporte,

seguros, tratamento e refino do concentrado mineral e as penalizações aplicadas geralmente devido à presença de metais contaminantes.

Um modelo NSR de um depósito mineral é, portanto, uma representação que tem por objetivo aproximar o NSR real que poderia ser derivado da lavra da mineralização sendo modelada e serve a dois propósitos principais: fornecer um denominador comum para comparações de amostras de depósitos polimetálicos e inculir uma consciência sobre os diversos fatores que influenciam o valor do minério (GOLDIE e TREDGER, 1991).

2.4 ABORDAGEM TRADICIONAL SOBRE OS TEORES DE CORTE

A política de COG corporativa tal como está construída atualmente será abordada daqui em diante como sendo a abordagem tradicional. O termo teor de corte (COG) foi utilizado até agora de forma genérica. Tecnicamente, o termo correto para esse trabalho é o de valor de corte (COV), pois, ao se tratar de uma mina polimetálica, se aplica o conceito de NSR (*Net Smelter Return*), do qual se deriva um valor, em \$/t, a ser usado como parâmetro de corte na criação de *stopes*³ pelo otimizador (*software Deswik.SO*). Daqui em diante, o termo COV será aplicado para se referir ao valor de corte como sinônimo do teor de corte, sem impacto nas definições apresentadas anteriormente.

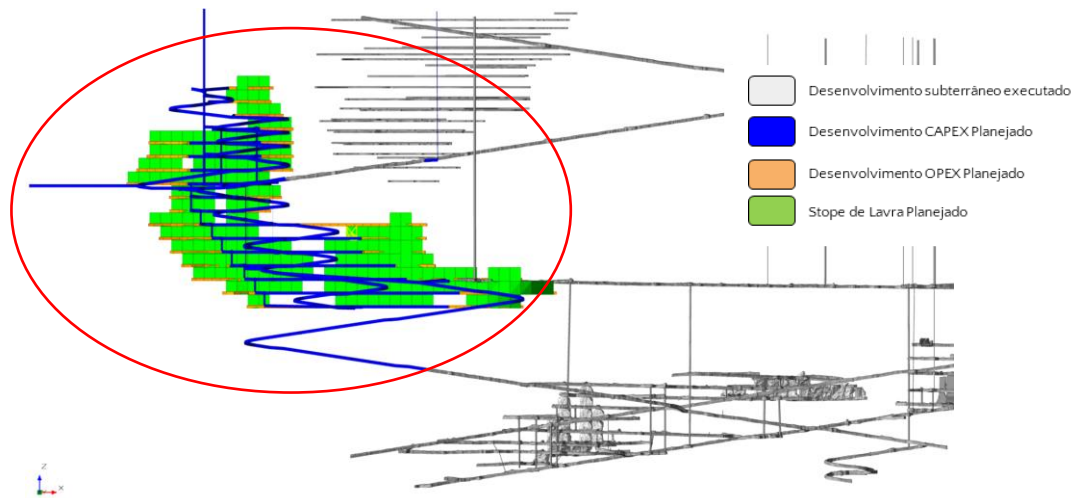
De forma simplificada e como critério geral utilizado na abordagem tradicional, as diferentes zonas da mina subterrânea podem se encontrar em três estágios distintos (não há uma nomenclatura formalmente definida para cada estágio na política corporativa. Os nomes foram aplicados de forma arbitrária ao estágio, respeitados os conceitos que o define):

- Zonas em fase de projeto (ZFP)

Essas zonas se encontram em estágios completamente não-desenvolvidos, para as quais não existe nenhum tipo de acesso e/ou infraestrutura. Essas zonas requerem investimento capital completo para seu desenvolvimento (infraestruturas associadas a atividade de lavra, rampas, galerias secundárias e acessórias). Um exemplo de ZPF é apresentado na Figura 2.2.

³ Termo aplicado a unidade mínima de lavra pelo método utilizado para lavra de minérios subterrânea (*sublevel stoping*).

Figura 2.2 – Zona em fase de projeto (ZFP).



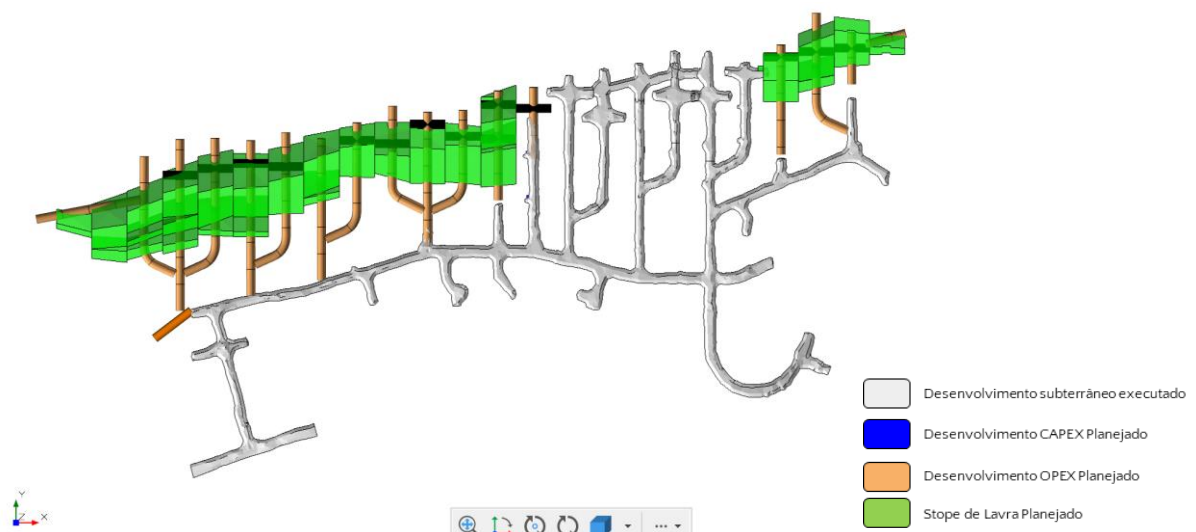
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em cor cinza, são apresentadas todas as galerias já desenvolvidas e *stopes* já lavrados na parte leste da mina. O círculo vermelho destaca uma nova zona que atende aos critérios estabelecidos anteriormente e, por isso, se trata de uma ZFP.

- Zonas em fase *Opex* (ZFO)

Essas zonas possuem parte da infraestrutura desenvolvida, ou seja, já possuem acesso por rampas, sistemas de ventilação e infraestrutura geral. No entanto, ainda requerem algum desenvolvimento *opex* que permita a lavra de *stopes*. Um exemplo de ZFO é apresentado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Zona em fase *Opex* (ZFO).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em cor cinza, se apresentam as galerias já desenvolvidas um determinado nível de uma das zonas da mina. Percebe-se que todo o desenvolvimento *capex* já está executado. Ainda que não se veja na imagem, se trata de uma zona que já possui todo o sistema de ventilação, energia, bombeamento e demais infraestruturas desenvolvidas. Em cor laranja, estão os desenvolvimentos *opex* necessários para acessar os *stopes* (em verde).

- Zonas em fase Lavra (ZFL)

Essas zonas possuem infraestrutura completamente desenvolvida e todos os investimentos capitais e operacionais executados. Para a lavra de *stopes* nessas zonas, se aplicam apenas os custos operacionais associados aos ciclos de lavra dos *stopes*, transporte e processamento mineral. Um exemplo de ZFL é apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Zona em fase Lavra (ZFL).



Fonte: Elaborado pelo autor.

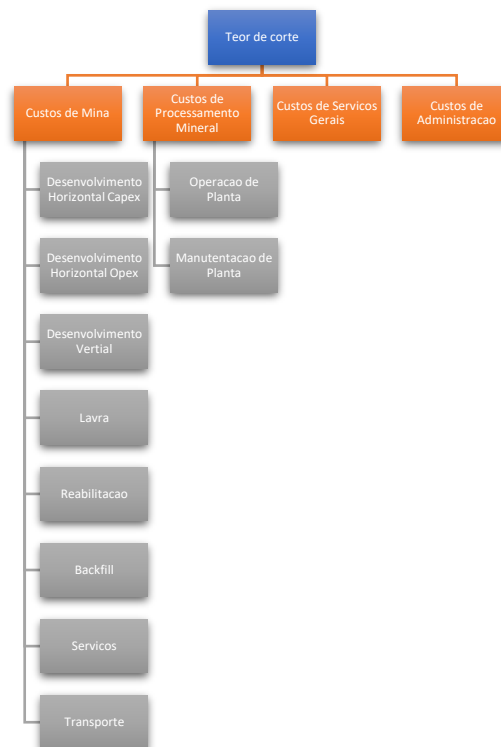
Em cor cinza, se apresentam as galerias já desenvolvidas um determinado nível de uma das zonas da mina. Percebe-se que todo o desenvolvimento *capex* e *opex* já estão executados. Ainda que não se veja na imagem, se trata de uma zona que já possui todo o sistema de ventilação, energia, bombeamento e demais

infraestruturas desenvolvidas. Em cor verde, estão os *stopes* já completamente liberados para a lavra.

A partir das distintas condições apresentadas, a atual política da companhia considera o cálculo de três COV – incremental, *full cut-off* (FCV) e *breakeven cut-off* (BEC). Dado que cada zona se encontra em estágios diferentes de desenvolvimento, essa política de valores tem por premissa que a lavra de *stopes* em zonas já completamente desenvolvidas requer menores custos e, portanto, exige valores de NSR médios mais baixos, enquanto a lavra de *stopes* em zonas não-desenvolvidas ou apenas inicialmente desenvolvidas é mais onerosa e, portanto, exige valores de NSR médios mais altos.

A estrutura de custos corporativa que fundamenta essa abordagem tradicional está além do escopo desse trabalho. No entanto, de forma resumida e simplificada, todos os custos incorridos na operação, manutenção, processamento, gestão e administração do fluxo produtivo estão expostos na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Estrutura de custos utilizada como referência para cálculo do teor de corte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante do exposto anteriormente em relação aos estágios de desenvolvimento das zonas na mina subterrânea e da divisão de custos, a Tabela 2.1 apresenta os três

tipos de teores de corte calculados como *input* para o planejamento estratégico segundo a abordagem tradicional.

Tabela 2.1 – Cálculos de teores de corte segundo abordagem tradicional

| | | Incremental | FCV | BEC |
|-------------------------------------|---------------|-------------|-----------|-----------|
| Desenvolvimento | | | | |
| Opex Horizontal | US\$/t | | 4,82 | 4,82 |
| Capex Horizontal | US\$/t | | | 8,29 |
| Capex Vertical | US\$/t | | | 0,31 |
| Produção de Stopes | | | | |
| Perfuração e Desmonte | US\$/t | 3,12 | 3,12 | 3,12 |
| Carregamento | US\$/t | 3,42 | 3,42 | 3,42 |
| Transporte | US\$/t | 2,52 | 2,52 | 2,52 |
| Suporte | US\$/t | 0,16 | 0,16 | 0,16 |
| Pastefill | US\$/t | 4,78 | 4,78 | 4,78 |
| Mao-de-obra | US\$/t | 4,05 | 4,05 | 4,05 |
| Serviços | | | | |
| Serviços Diretos | US\$/t | 1,60 | 3,19 | 3,19 |
| Serviços Indiretos | US\$/t | | 2,43 | 2,43 |
| Serviços Indiretos - Equipamentos | US\$/t | | 4,43 | 4,43 |
| Energia | US\$/t | 4,10 | 4,10 | 4,10 |
| Mao-de-obra Técnica | | | | |
| Geologia | US\$/t | 0,83 | 0,83 | 0,83 |
| Operação | US\$/t | 1,56 | 1,56 | 1,56 |
| Serviços Técnicos | US\$/t | 0,79 | 0,79 | 0,79 |
| CUSTO TOTAL DE MINA | US\$/t | 27 | 40 | 49 |
| Processamento Mineral - Operação | US\$/t | 14,79 | 14,79 | 14,79 |
| Processamento Mineral - Manutenção | US\$/t | 4,89 | 4,89 | 4,89 |
| CUSTO TOTAL DE PROCESSAMENTO | US\$/t | 20 | 20 | 20 |
| Serviços Gerais | US\$/t | 2,85 | 2,85 | 2,85 |
| Administração | US\$/t | 4,16 | 4,16 | 4,16 |
| TOTAL G&A | | 7 | 7 | 7 |
| TOTAL CUT-OFF | US\$/t | 55 | 68 | 77 |

Fonte: Elaborado do autor.

De acordo com a abordagem tradicional, o estágio de desenvolvimento da zona (ou do nível ou, inclusive, de um único perfil) vai definir qual o COV a ser utilizado para a criação do *stope* daquela zona, nível ou perfil através do *software* Deswik.SO (Tabela 2.2).

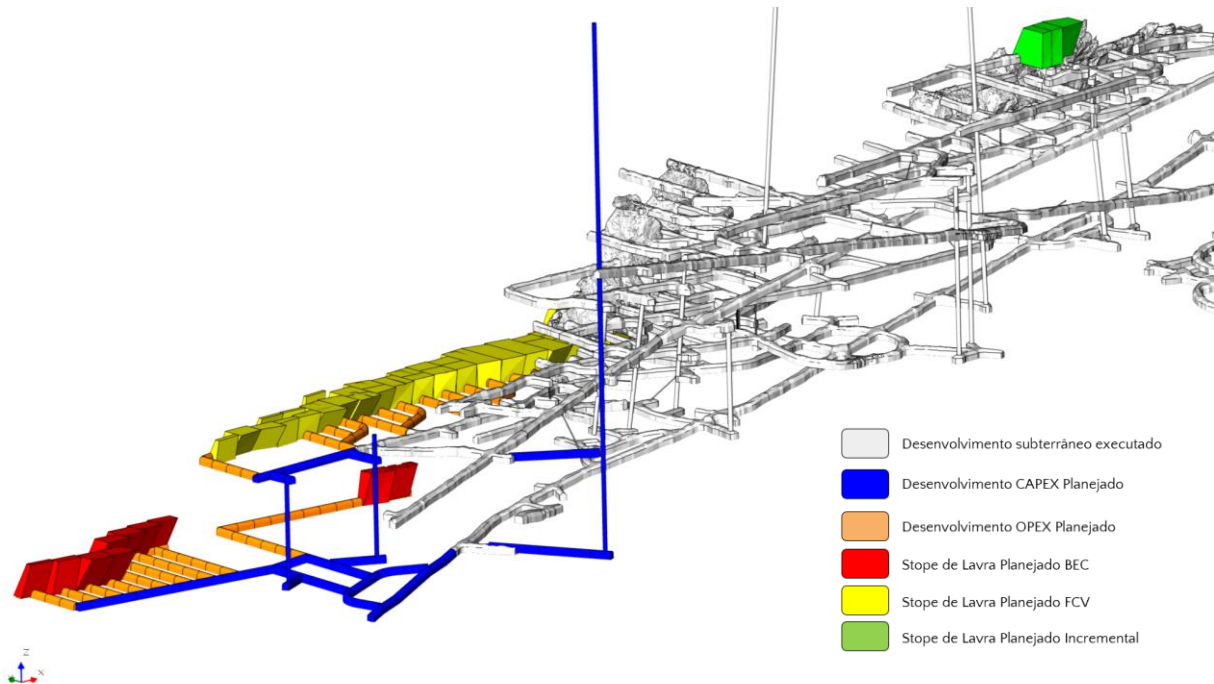
Tabela 2.2 – Teores de corte definidos para plano estratégico segundo abordagem tradicional

| Estágio | NSR de Corte (\$/t) |
|-------------------------|----------------------------|
| Zona em fase de Projeto | 77 |
| Zona em fase Opex | 68 |
| Zona em fase Lavra | 55 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 2.6 apresenta um resumo do método segundo a abordagem tradicional. Conforme comentado inicialmente, se trata de uma abordagem com aspectos determinísticos ao operar sobre um único candidato à solução, definido a partir de um único critério objetivo a partir do qual se deriva um único plano para o ativo, dado como ótimo.

Figura 2.6 – Ilustração geral das três possíveis condições encontradas na mina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em vermelho, estão os *stopes* criados através do *software* Deswik.SO com NSR de corte em \$77/t, pois se trata de uma zona em fase de projeto que requer todo desenvolvimento capital horizontal, vertical e operacional. Em amarelo, são *stopes* criados com NSR de corte em \$68/t, pois se trata de uma zona de fase *opex* que apenas requer desenvolvimento *opex*. Em verde, são *stopes* criados com NSR em \$55/t, pois já possuem todo o desenvolvimento executado.

Assim, para a abordagem tradicional, serão criados, através do *software* Deswik.SO, *stopes* com os três COV para todas as zonas da mina. Em seguida, serão selecionados os *stopes* finais a serem considerados com base aos critérios de estágios apresentados. A partir daí, serão ajustadas as polilinhas de desenvolvimentos *capex* e *opex*, verticais e horizontais utilizando o *software* Deswik.CAD. Finalmente, os pacotes de *software* Deswik.IS e Deswik.Sched serão

utilizados para criar tarefas, dependências e sequenciar as atividades, que resultarão em um plano final que será considerado o produto da abordagem tradicional.

Os dados desse plano, que incluem toneladas de minério, metros de desenvolvimento horizontal e vertical divididos por tipos, metros de sondagem e toneladas de *backfill*, serão inseridos em um modelo de custos em base anual, a partir do qual será derivado um cálculo de VPL a uma dada taxa de desconto de 7%.

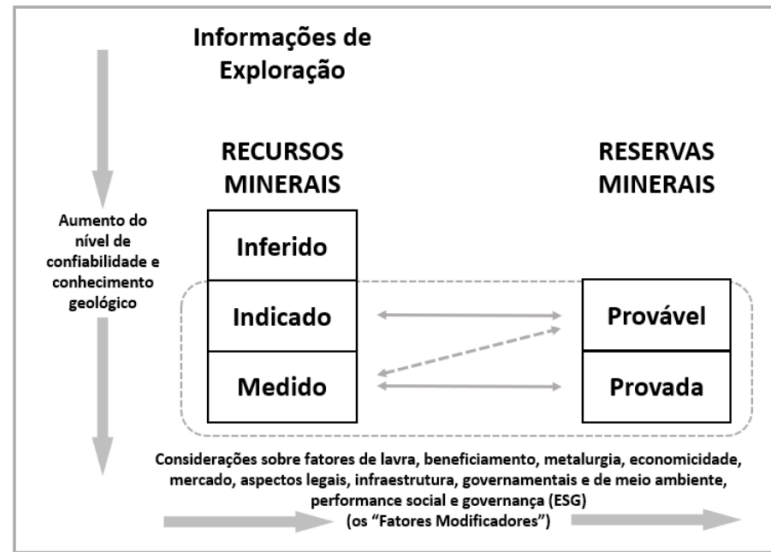
2.5 RECURSOS E RESERVAS

Em geral, os padrões internacionais de declaração de recursos/reservas minerais podem ser subdivididos em duas classes: Sistemas Internacionais e Códigos/Padrões Nacionais. Os mais notórios são o *Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards* (CRIRSCO, 2019) e o *Joint Ore Reserves Committee* (JORC, 2012).

No Brasil, a Comissão Brasileira de Recursos e Reservas (CBRR) atua como a autoridade nacional responsável pela classificação e reporte de recursos e reservas minerais. A CBRR enfatiza a importância do relato preciso e transparente, garantindo a comparabilidade dos dados tanto em nível nacional quanto internacional (CBRR, 2022). Essa abordagem está alinhada com os padrões globais estabelecidos por organizações como o CRIRSCO, facilitando investimentos e promovendo a confiança entre as partes interessadas.

Assim como o código JORC (JORC, 2012), o guia CBRR (2022) para declaração de informações de exploração, recursos minerais e reservas minerais adota como princípios a transparência, a materialidade e a competência. As definições padrão CBRR estabelecem a estrutura para classificar as estimativas de tonelagem e teor de minério, refletindo os diferentes níveis de confiança geológica e diferentes graus de avaliação técnica e econômica (Figura 2.7).

Figura 2.7 – Resultados de Exploração, Recursos Minerais e Reservas Minerais.



Fonte: CBRR, 2022.

A estimativa de recursos e reservas é uma etapa crítica no desenvolvimento de uma mina e na progressão de um projeto de exploração para uma mina em produção. Os dados de entrada tipicamente mudam ao longo do tempo e refletem variações no conhecimento geocientífico, assim como dos fatores modificadores necessários para estimar reservas. A importância desses dados para a indústria mineral é tal que é também essencial informar aos investidores e o público amplo sobre a natureza das estimativas de recursos e reservas e o significado da terminologia associada ao considerar o suprimento mineral global e o papel da mineração nas sociedades modernas. (Jowitt; McNulty, 2021)

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo, a unidade mínima de lavra em uma mina subterrânea será chamada de *stope*. Assim, um *stope* deve ser entendido como uma envoltória em três dimensões gerada a partir de um *software* de otimização de *stopes* para um dado teor de corte. Conforme mencionado anteriormente, ao se tratar de uma mina polimetálica, se aplica o conceito de NSR (*Net Smelter Return*). Sob essa ótica, além dos teores referentes a cada um dos tipos metálicos que integram um determinado bloco do modelo, também é atribuído a cada um deles um valor de NSR, que é uma medida do valor do minério com base em sua composição metálica. O NSR fornece um denominador comum ao bloco e ao depósito, pois considera diferentes preços, recuperações, penalidades e custos de transporte e refino para os metais.

Ainda que, em termos práticos, o procedimento para a definição de *stopes* utilizando os *softwares* de otimização de *stopes* seja o mesmo, daqui em diante, o termo COV será utilizado para se referir ao valor de corte com base no NSR, que é o utilizado na mina de Aguas Teñidas. Para esse trabalho, o *software* Deswik.SO versão 4.1.3566 será utilizado para a otimização de *stopes*.

3.1 ABORDAGEM OTIMIZADA

Em contraste à abordagem tradicional aplicada atualmente pela companhia, se propõe nesse trabalho o que, a partir desse ponto, será chamado de abordagem otimizada. Pela abordagem otimizada, não há um COV extrínseco ao controle da empresa determinado a partir de um conjunto de dados de custos, que resultará em um único plano de lavra possível. Pelo contrário, há uma infinidade de COV possíveis, sendo que cada um resultará em um desfecho diferente no que diz respeito a ritmos de produção e VPL. É responsabilidade da direção estratégica da companhia definir aquele que esteja mais alinhado à missão corporativa.

Diante disso, os cálculos dos três COV apresentados na seção 3.1 – incremental, *full cut-off* (FCV) e *breakeven cut-off* (BEC) – podem ser boas referências para guiar o processo de definição do COV, mas não devem ser tomados como verdades absolutas. Ainda que a definição do plano estratégico final possa ser motivada por múltiplos objetivos corporativos, nesse trabalho será utilizado o critério

de VPL, que está alinhado com a maioria dos objetivos estratégicos de maximizar o valor para os acionistas.

A abordagem otimizada é iterativa, ou seja, um COV é definido arbitrariamente (como mencionado, valores de referência podem ser utilizados como guia) e, a partir dele, é gerado um conjunto de *stopes* através do *software* Deswik.SO para as diferentes zonas da mina. Esse conjunto de *stopes* passa, então, pelo mesmo processo apresentado na seção anterior (ajustes de polilinhas de desenvolvimentos *capex* e *opex*, verticais e horizontais, criação de tarefas, dependências e sequências) e resultam em um plano. Os dados de produção e desenvolvimento desse plano são inseridos em uma base de custos, que resulta em um VPL para uma dada taxa de desconto. A partir desse ponto, todo o processo se repete para um novo COV de referência, maior ou menor que o primeiro, sendo que cada nova iteração resulta em um novo plano e um novo valor de VPL.

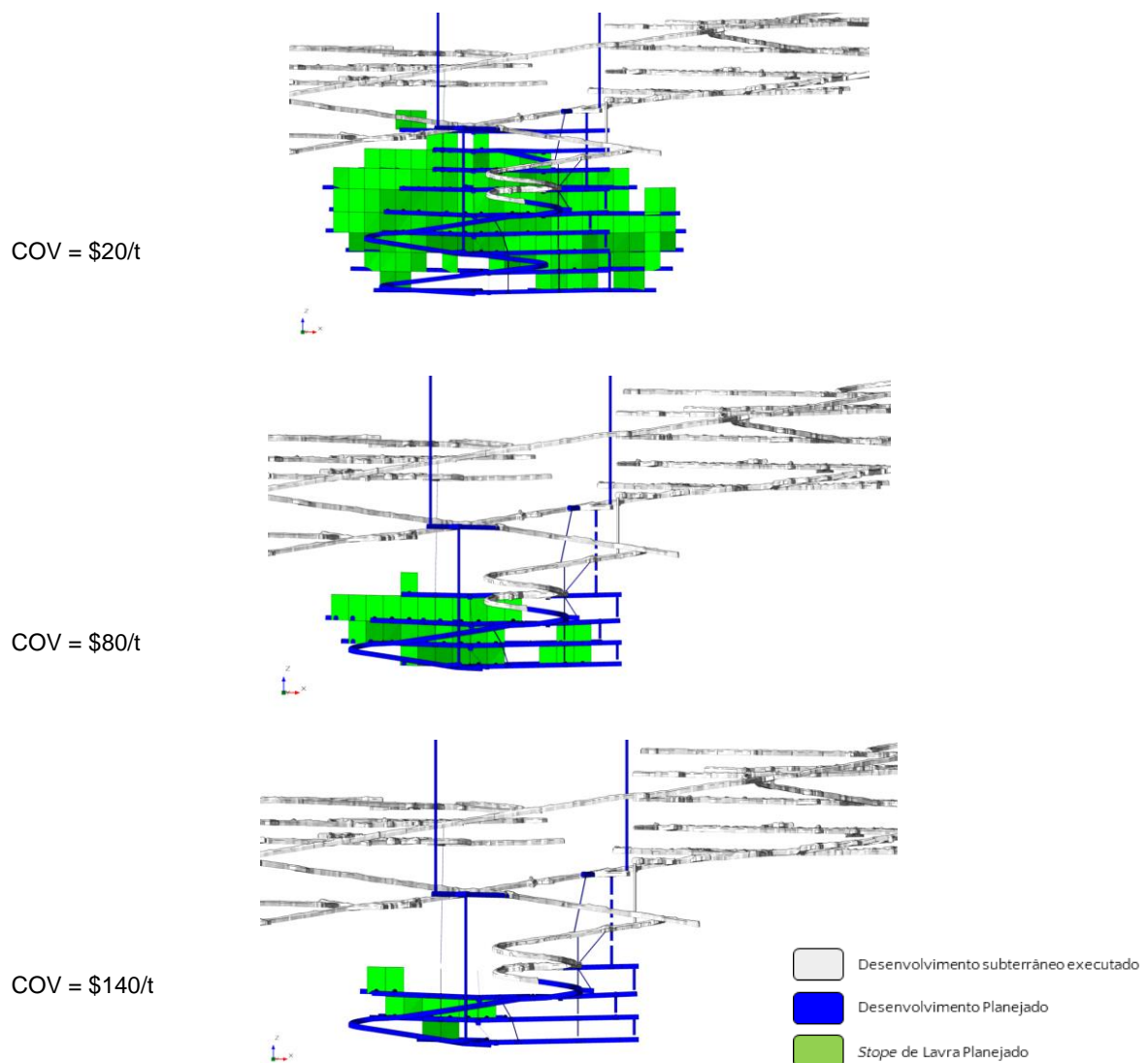
Apesar de ser um processo bastante intensivo na utilização de recursos, pela complexidade envolvida em criar tarefas, dependências e sequências a cada iteração, a experiência do operador na utilização das ferramentas é muito importante. Uma vez construída a base de polilinhas de desenvolvimento e desenvolvido um modelo de automatização de criação de dependências, a criação de cenários adicionais deve ser bastante mais simples e rápida. Além disso, a abordagem otimizada está mais interessada nas diferenças relativas e nos benefícios marginais entre cenários pela variação do COV (mantidas todas as demais variáveis inalteradas) que em valores absolutos de VPL. Sendo assim, não há um rigor técnico excessivo no que diz respeito aos detalhes de desenhos e à precisão dos tempos, desde que as mesmas premissas sejam assumidas para os cenários comparados.

Nesse processo, cabe ao analista investigar o nível de detalhes que deseja incorporar ao processo. Diferentes COV podem ser utilizados para otimizar *stopes* para um determinado perfil, um nível, uma zona ou toda a mina. Obviamente, quanto maior a complexidade da análise, mais recursos e tempo serão consumidos. Nesse trabalho, diferentes COV serão utilizados para otimizar os *stopes* de cada zona da mina, ou seja, será uma otimização por zonas. Assim, todas os *stopes* para uma dada zona serão criados utilizando um mesmo valor de corte. No entanto, diferentes zonas da mina podem encontrar seu pico de VPL com diferentes COV.

A análise por zonas é julgada conveniente para esse trabalho pelas questões relacionadas aos estágios de desenvolvimento apresentados anteriormente. Em resumo, espera-se que, após todas as iterações realizadas, cada zona da mina tenha seu próprio gráfico COV x VPL, conforme o exemplo apresentado na Figura 1.1.

A partir desse ponto, os planos de máximo VPL definidos para cada zona serão integrados para formar o plano final da mina. Para esse trabalho, propõe-se iniciar a análise de cada zona em um COV de \$20/t e incrementar esse valor, sucessivamente, em \$10/t até o ponto máximo em \$140/t. A Figura 3.1 apresenta uma visão geral preliminar de uma das zonas da mina quando definida por diferentes COV (\$20/t, \$80/t, e \$140/t).

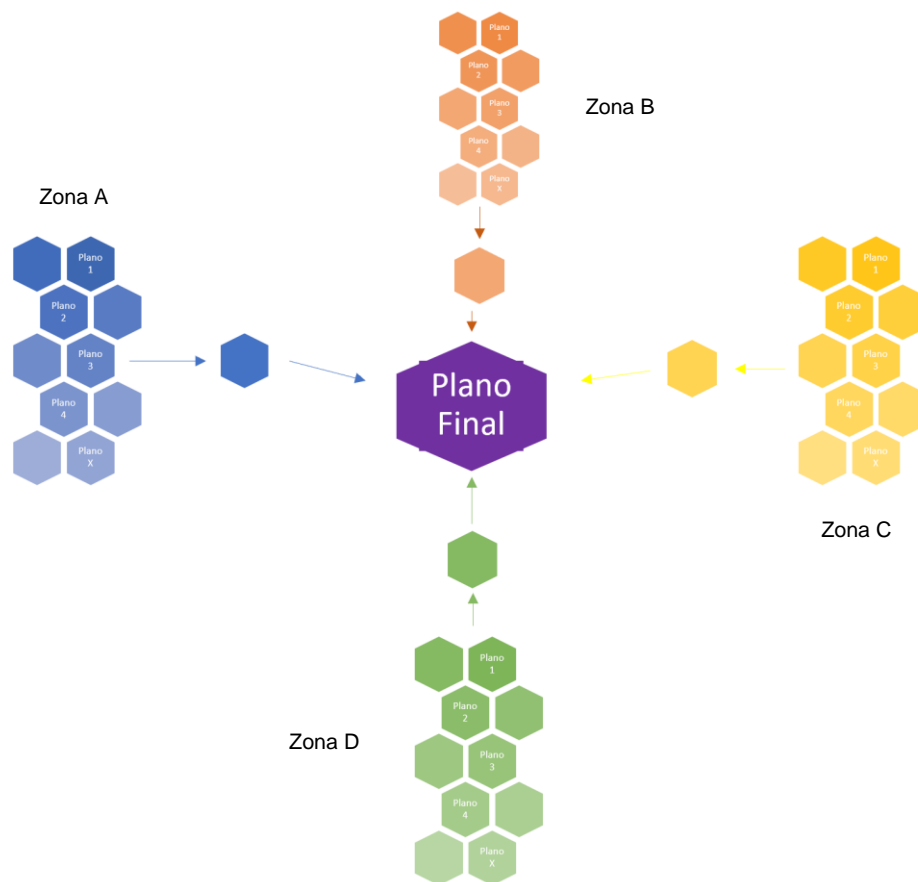
Figura 3.1 – Evolução da geração de stopes em uma zona em função da variação do teor de corte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O plano final pela abordagem otimizada será a integração do melhor resultado a partir de diversos subplanos elaborados como resultado de cada iteração pela variação dos COV. O diagrama apresentado na Figura 3.2 é uma representação gráfica do processo pela abordagem otimizada. Como tal, o valor de corte passa a ser visto como um resultado do planejamento estratégico após a avaliação de um número suficiente de cenários que permita uma tomada de decisão alinhada aos objetivos corporativos.

Figura 3.2 – Diagrama ilustrativo do método de definição de teores de corte pela abordagem otimizada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tanto para a abordagem tradicional quanto para a abordagem otimizada, foram consideradas quatro zonas distintas da mina subterrânea: Castillejitos (ACT), *Stockwork* Profundo (AEW), Extensión Oeste (AEX) e Calañesa (AOM). Para a abordagem tradicional, a seleção de *stopes* será feita conforme metodologia descrita, que resultará em uma única sequência de lavra. Para a abordagem otimizada, serão

elaboradas treze sequências de lavra para cada zona da mina, conforme incremento sucessivo de COV descrito anteriormente, para um total projetado de 52 planos de lavra. Para cada zona, será apresentado um resultado gráfico com as variações relativas de toneladas, NSR e VPL.

A fim de entender o impacto da otimização de COV em cada uma das zonas individualmente, o conjunto de *stopes* selecionados sob o conceito da abordagem tradicional para cada zona será utilizado para um sequenciamento independente das demais. Os resultados do sequenciamento individual serão, então, comparados aos resultados de melhor geração de valor segundo o método da abordagem otimizada para cada zona.

Essa metodologia é importante porque os planos são nivelados por recursos e os resultados esperados ao nivelar-se todas as zonas da mina em conjunto podem, potencialmente, diferir dos resultados dos nivelamentos individuais. Consequentemente, há potencial impacto na medida do VPL, uma vez que o método de fluxos de caixa descontados penaliza ou potencializa transferências de produção no tempo. Ao nivelar-se individualmente cada uma das zonas, será utilizado o plano global como referência para os alvos de produção em cada cenário.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

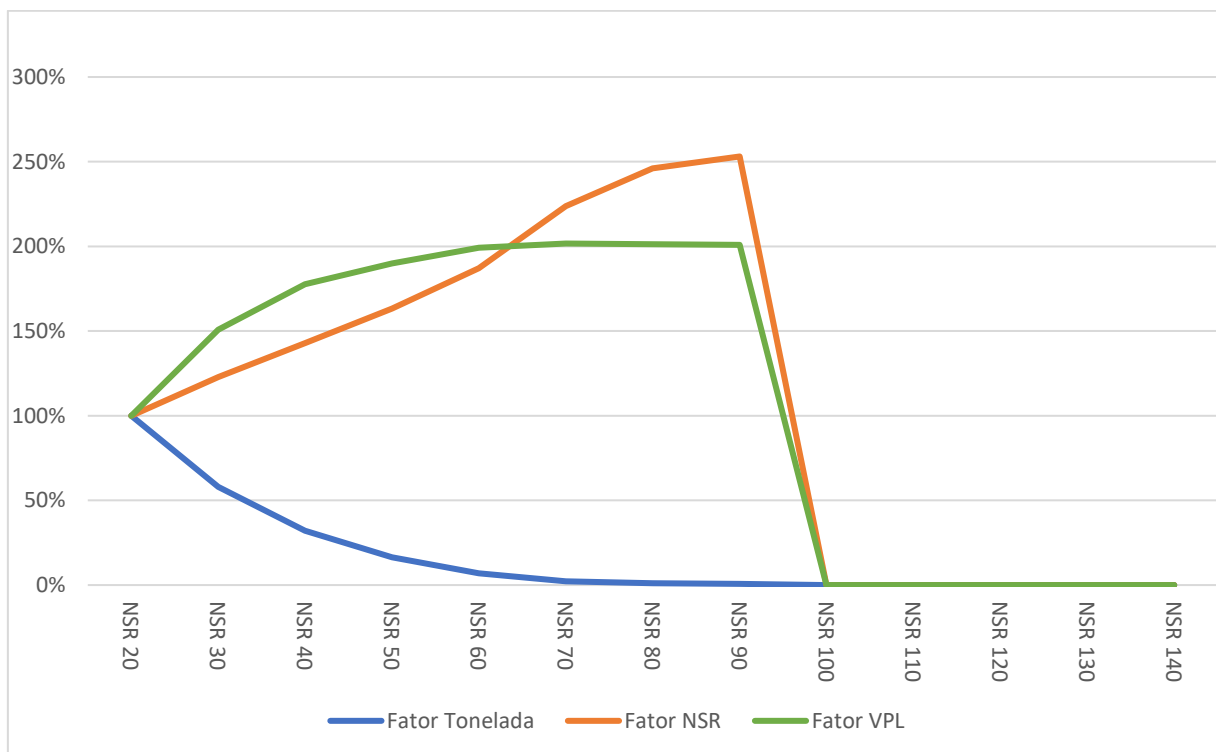
Conforme exposto anteriormente, o maior interesse ao otimizar-se COV reside nos ganhos ou perdas de valor marginais relacionados à sua variação. Portanto, nesse trabalho, todos os resultados são apresentados em termos relativos. Para cada uma das zonas da mina, os valores de VPL, toneladas e NSR resultantes para o cenário de COV NSR = \$20/t foram utilizados como pontos de partida de referência, para os quais foi adotado um valor de 100%. Todos os demais resultados são apresentados como variações percentuais em relação a esta referência. Nos gráficos para as curvas de otimização a seguir, cada par de coordenadas (x,y) representa um plano sequenciado e nivelado.

4.1 OTIMIZAÇÃO DE COV POR ZONAS

4.1.1 Zona ACT

A Figura 4.1 mostra o resultado da otimização de COV para a zona ACT.

Figura 4.1 – Otimização de COV para zona ACT.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A zona ACT é uma zona de baixo NSR médio, o que pode ser percebido pela alta inclinação da curva do Fator Tonelada. Uma variação de COV de NSR = \$20/t

para NSR = \$30/t implica em redução de 42% das toneladas iniciais. Com um COV NSR = \$60/t, apenas 7% das toneladas iniciais são obtidas. Para um COV NSR \geq \$100/t, nenhum resultado foi obtido pelo otimizador de *stopes*, ou seja, nenhuma massa foi classificada com minério.

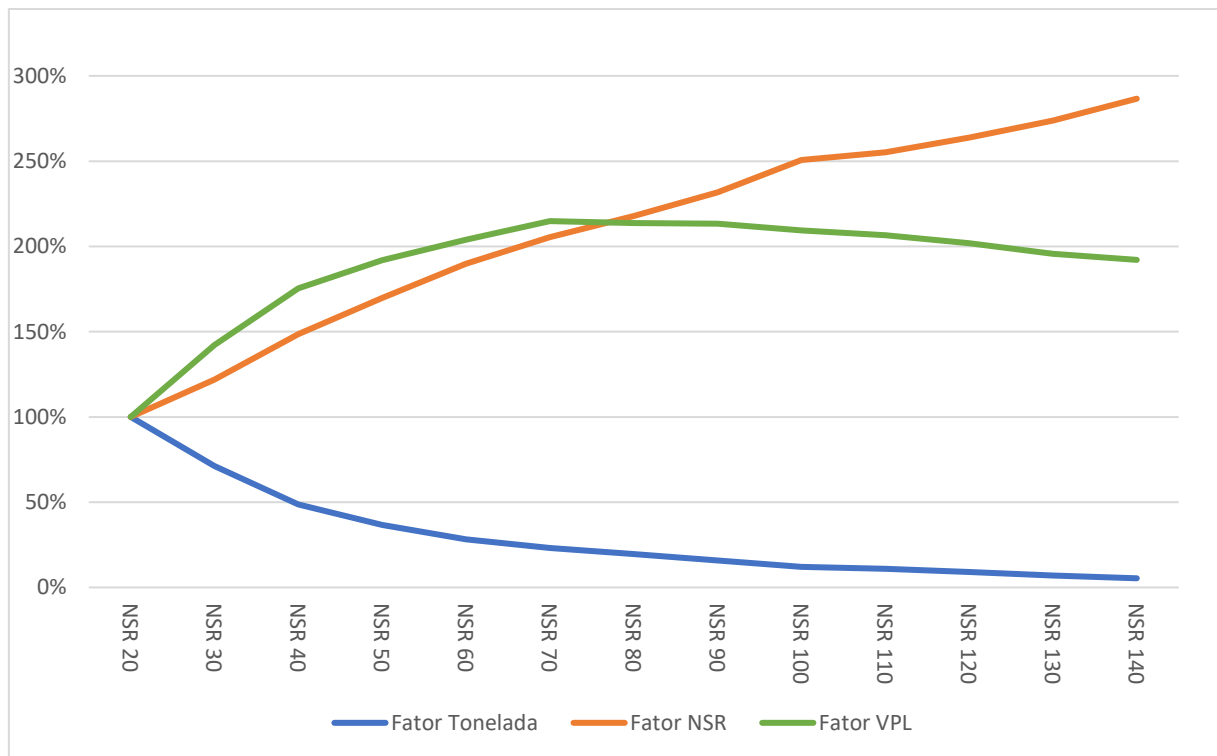
Além disso, há uma forte evidência de que a maior parte dos cenários para a zona ACT não gera VPL positivo ao tomar-se como referência o COV Incremental utilizado para a geração de *stopes* pela abordagem tradicional (NSR = \$55/t) que, em teoria, representa o *breakeven* para *stopes* em Zonas em Fase de Lavra (ZFL).

Segundo o gráfico apresentado na Figura 4.1, o cenário de NSR = \$70/t é o que aporta o melhor VPL para a zona ACT, com um expressivo incremento de 102% na geração de valor quando comparado ao cenário de referência. No entanto, esse cenário representa apenas 1% das toneladas obtidas no cenário de referência.

4.1.2 Zona AEW

A Figura 4.2 mostra o resultado da otimização de COV para a zona AEW.

Figura 4.2 – Otimização de COV para zona AEW.



Fonte: Elaborado pelo autor.

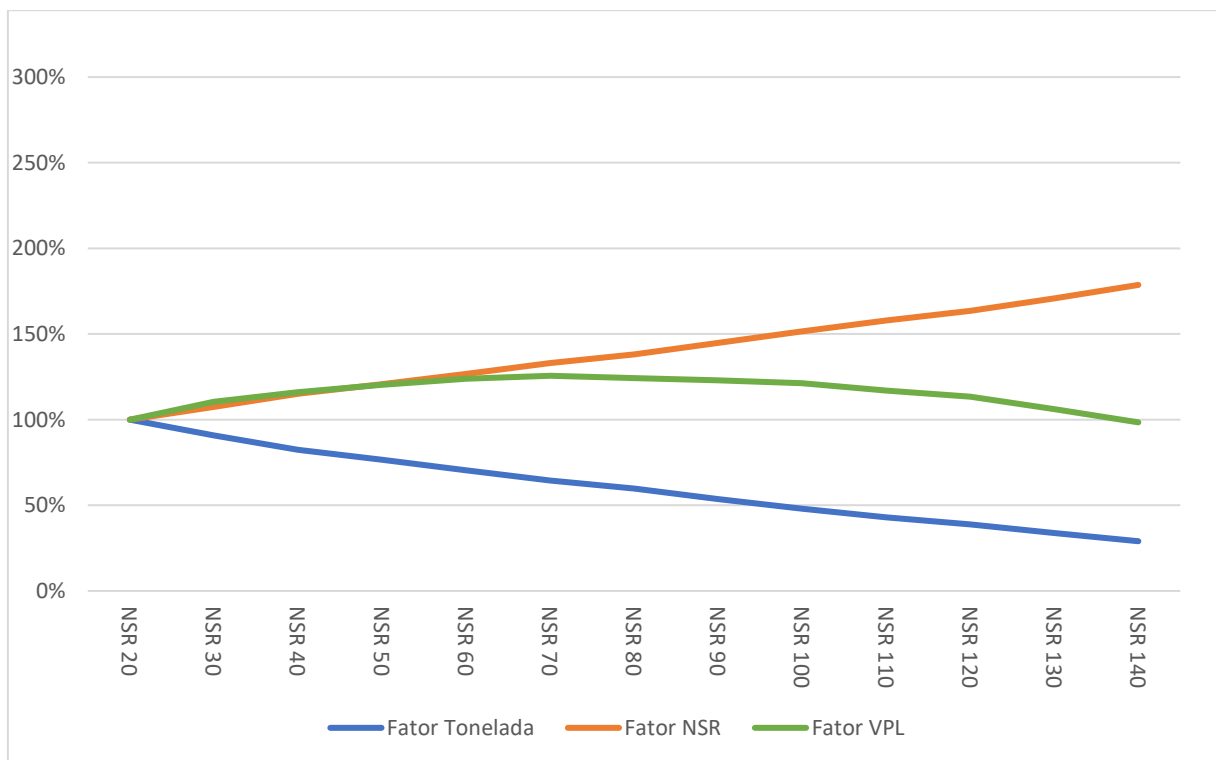
Assim como a zona ACT, a zona AEW também é bastante sensível a geração de *stopes* com pequenos incrementos de NSR COV, ainda que em menor intensidade, o que pode ser percebido pela inclinação da curva Fator Tonelada. Além disso, NSR COV \geq \$100/t são capazes de gerar *stopes*, ainda que em pequenos volumes decrescentes.

Conforme os dados apresentados na Figura 4.2, o máximo valor para essa zona é obtido com um NSR COV = \$70/t. Pela condição atual em que se encontra, 94% dos *stopes* da zona AEW se enquadram nos critérios de Zona em Fase de Projeto (ZFP), adotado para seleção de *stopes* segundo a abordagem tradicional. Segundo esse critério, *stopes* para ZFP requerem um valor de corte de *breakeven* (BEC), que equivale a \$77/t. Dessa forma, não se espera uma diferença expressiva entre os resultados do plano pela abordagem tradicional e o plano de máximo VPL pela abordagem otimizada para essa zona.

4.1.3 Zona AEX

A Figura 4.3 mostra o resultado da otimização de COV para a zona AEX.

Figura 4.3 – Otimização de COV para zona AEX.



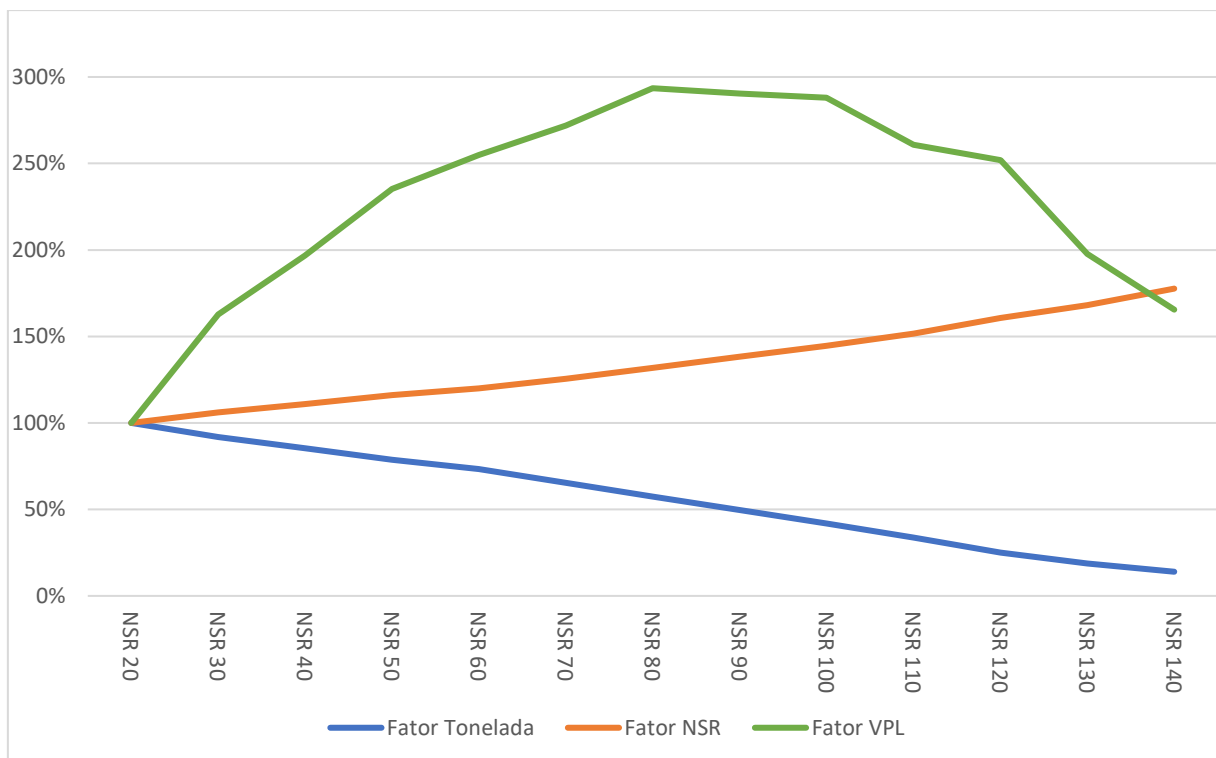
Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme se observa na Figura 4.3, a zona AEX é pouco sensível a variações de NSR COV, demonstrado pela pequena concavidade da curva de Fator NSR e pela baixa inclinação da curva Fator Tonelada. A zona AEX é uma zona de alto NSR médio e de grande importância, ao representar aproximadamente 64% de todo o inventário mineral da mina subterrânea. Ainda que pouco sensível, otimizações de um dígito podem corresponder a dezenas de milhões de dólares de incremento nos resultados de VPL. O resultado de maior VPL é obtido para um NSR COV = \$70/t para a zona AEX.

4.1.4 Zona AOM

A Figura 4.4 mostra o resultado da otimização de COV para a zona AOM.

Figura 4.4 – Otimização de COV para zona AOM.



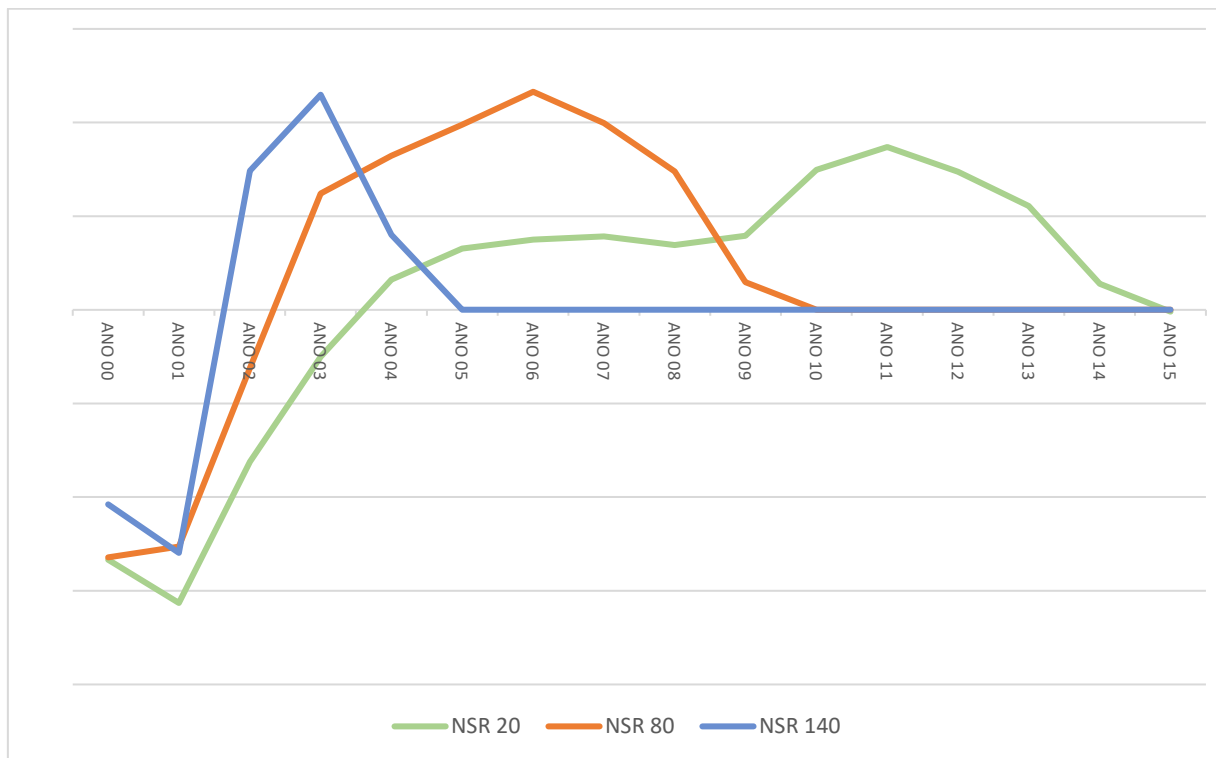
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.4 mostra que a zona AOM é bastante sensível a variações de NSR COV, principalmente para os resultados de VPL, evidenciados pela grande concavidade da curva Fator VPL. Esse comportamento se dá porque, conforme comentado, ao se tratar majoritariamente de uma Zona em Fase de Projeto, requer grande volume de desenvolvimento *capex* e, conseqüentemente, apresenta resultados de fluxo de caixa negativos em seus primeiros anos.

Nos cenários de NSR COV muito baixos, os resultados negativos se estendem por anos adicionais porque se incrementa muito a massa e, conseqüentemente, os custos e, no entanto, a concentração de metais adicional é marginal. Por outro lado, com NSR COV muito altos, não há material suficiente para pagar todo o investimento necessário. Ainda que haja resultado positivo, ele se estende por um período muito curto. Na faixa central de NSR COV, fluxos de caixa positivos (ou menos negativos) são antecipados e têm resultado potencializado quando trazidos a valor presente.

A Figura 4.5 demonstra como resultados positivos antecipados aportam uma grande diferença de valor calculado para um cenário. No cenário COV NSR = \$140/t, o fluxo de caixa para o ANO 02 é 192% superior ao do cenário COV NSR = \$20/t. No entanto, há poucas toneladas disponíveis. Enquanto isso, o cenário COV NSR = \$80/t, ainda que menos positivo nos primeiros anos, se sustenta por mais tempo e, por conseqüência, alcança melhor resultado de VPL.

Figura 4.5 – Resultados de fluxos de caixa para os cenários de COV NSR = 20\$/t, \$80/t e \$140/t.



Fonte: Elaborado pelo autor.

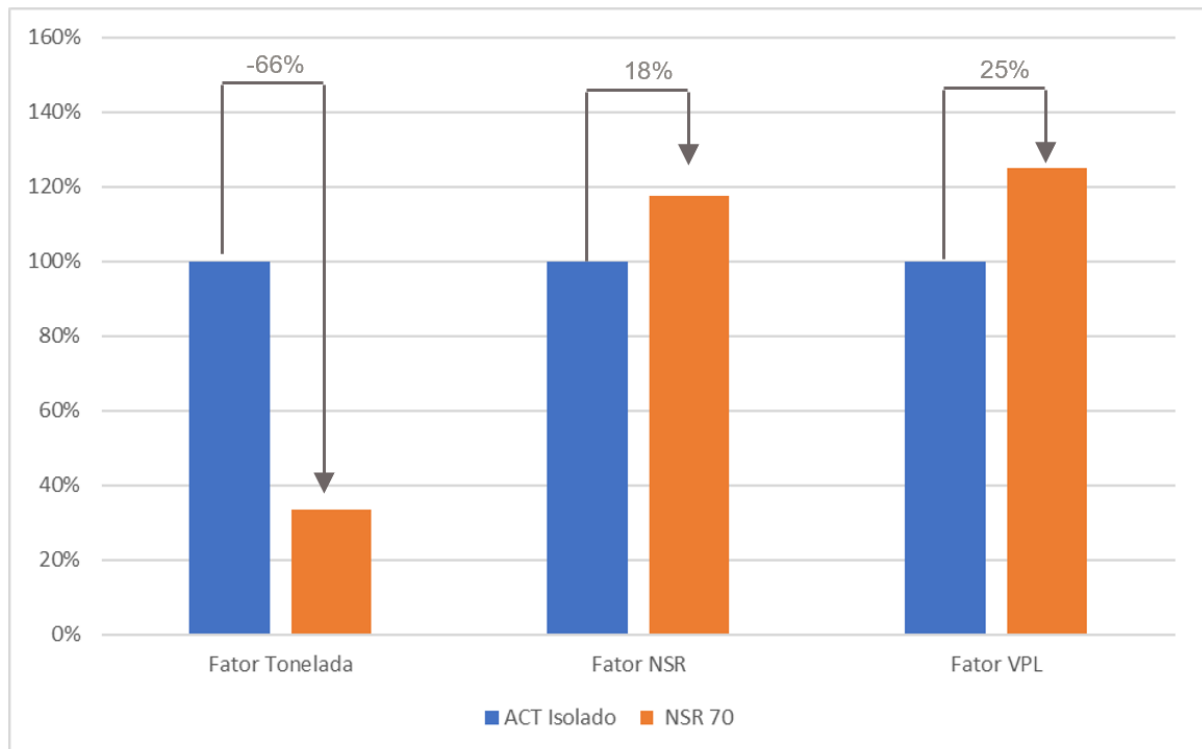
O resultado de maior VPL é obtido para um NSR COV = \$80/t para a zona AOM.

4.2 COMPARAÇÃO INDIVIDUAL POR ZONAS – ABORDAGEM TRADICIONAL X ABORDAGEM OTIMIZADA

4.2.1 Zona ACT

Com base na Figura 4.1, o cenário de COV NSR = \$70/t é o que aporta o melhor VPL para essa zona. A Figura 4.6 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a sequência isolada de *stopes* selecionados segundo a abordagem tradicional e o cenário de melhor VPL selecionado para a zona segundo a abordagem otimizada.

Figura 4.6 – Sequência isolada de *stopes* selecionados pelo critério da abordagem tradicional e cenário selecionado através da abordagem otimizada para zona ACT



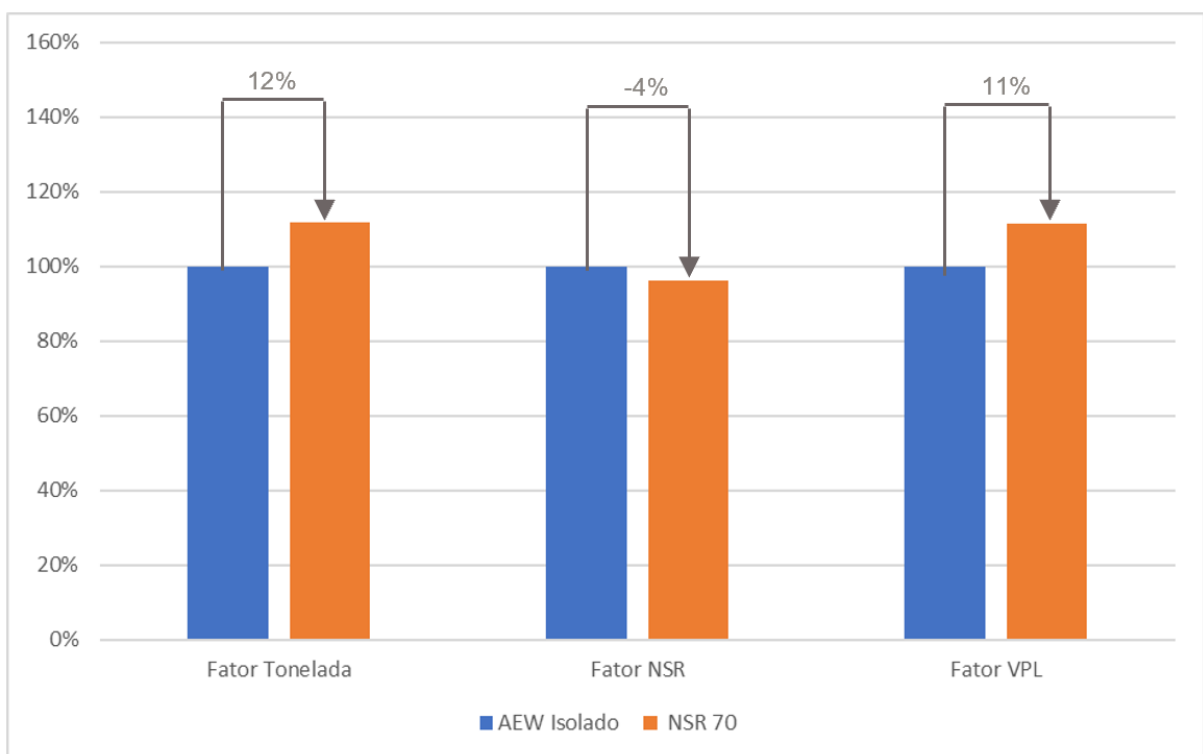
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.6 mostra que, para a zona ACT, o melhor cenário segundo a abordagem otimizada alcança resultado de VPL 25% superior quando comparado ao conjunto de *stopes* selecionados segundo o critério da abordagem tradicional. Isso se dá porque a maior parte das toneladas são prontamente eliminadas do plano ao não agregar valor ao resultado, conforme mostra o Fator Tonelada, 66% inferior no plano otimizado. Como consequência lógica, o NSR do plano otimizado é 18% superior ao do plano segundo abordagem tradicional.

4.2.2 Zona AEW

Com base na Figura 4.2, o cenário de COV NSR = \$70/t é o que aporta o melhor VPL para essa zona. A Figura 4.7 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a sequência isolada de *stopes* selecionados segundo a abordagem tradicional e o cenário de melhor VPL selecionado para a zona segundo a abordagem otimizada.

Figura 4.7 – Sequência isolada de *stopes* selecionados pelo critério da abordagem tradicional e cenário selecionado através da abordagem otimizada para zona AEW.



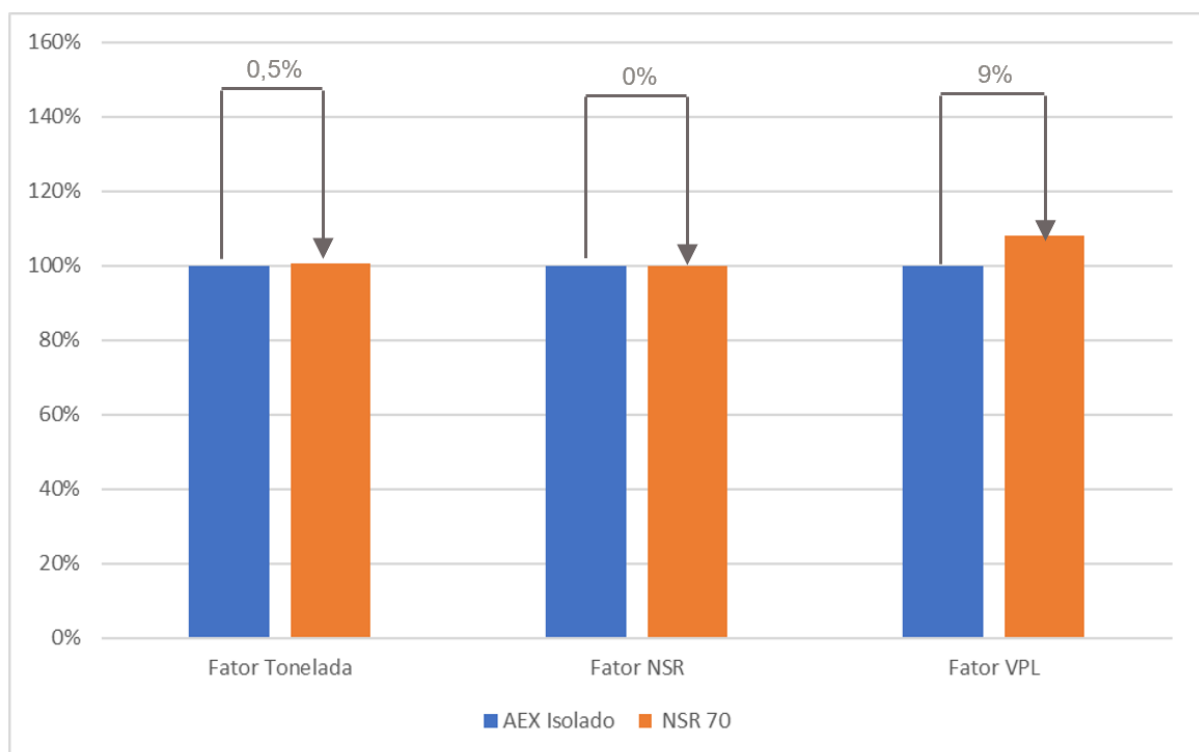
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.7 mostra que, para a zona AEW, o melhor cenário segundo a abordagem otimizada alcança resultado de VPL 11% superior quando comparado ao conjunto de *stopes* selecionados segundo o critério da abordagem tradicional. Ainda assim, resulta em incremento de toneladas da ordem de 12%, indicando que a abordagem tradicional, ao empregar um processo rígido e determinístico para a definição do COV, falha ao não incorporar *stopes* de NSR inferior ao que, em teoria, seria o mínimo necessário para Zonas em Fase de Projeto, mas que tem potencial para adicionar valor à zona. Como consequência direta, o fator NSR demonstra uma redução de 4%.

4.2.3 Zona AEX

Com base na Figura 4.3, o cenário de COV NSR = \$70/t é o que aporta o melhor VPL para essa zona. A Figura 4.8 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a sequência isolada de *stopes* selecionados segundo a abordagem tradicional e o cenário de melhor VPL selecionado para a zona segundo a abordagem otimizada.

Figura 4.8 – Sequência isolada de *stopes* selecionados pelo critério da abordagem tradicional e cenário selecionado através da abordagem otimizada para zona AEX.

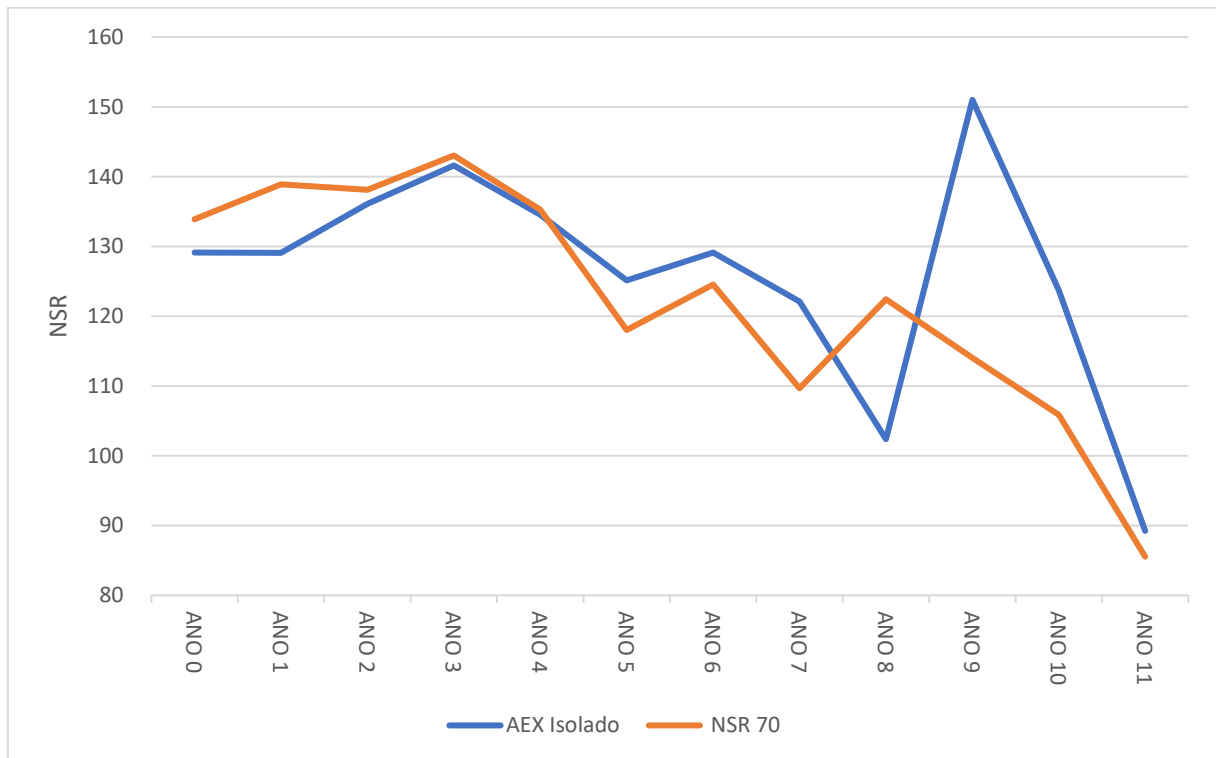


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.8 mostra que para a zona AEX, o melhor cenário segundo a abordagem otimizada alcança resultado de VPL 9% superior quando comparado ao conjunto de *stopes* selecionados segundo o critério da abordagem tradicional. Há uma variação positiva muito discreta de 0,5% no Fator Tonelada para o cenário otimizado, e o Fator NSR não sofre alteração. A única possibilidade de uma maior geração de valor a partir de conjuntos de *stopes* de toneladas e NSR muito similares é uma sequência de maior valor nos primeiros anos, ao se tratar de medição por fluxos de caixa descontado. Esse comportamento é evidenciado na Figura 4.9, na qual é possível perceber que, ainda que os critérios de criação de dependências, alocação

de recursos, objetivos de produção, NSR médios e todos os demais parâmetros tenham sido mantidos inalterados, o conjunto de *stopes* para o cenário otimizado produz melhor resultados de NSR nos anos iniciais do plano, o que resulta em maior geração de valor.

Figura 4.9 – Comparação de NSR por ano entre planos otimizado e tradicional.



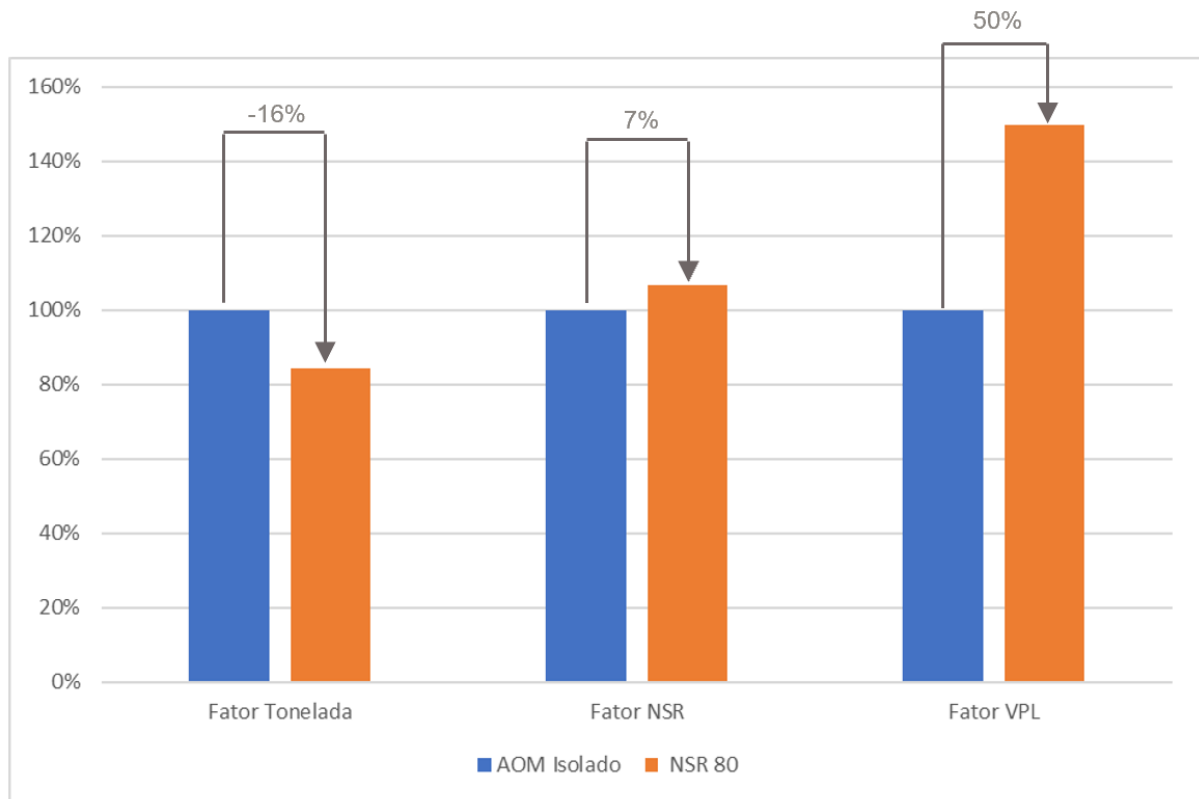
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda que as sequências sejam definidas pelas mesmas dependências e alvos de produção, a possibilidade de diferentes tamanhos de *stopes* gerados para os diferentes métodos leva a pequenas diferenças na alocação dos *stopes* no tempo, o que pode justificar as alterações de picos e vales, especialmente nos ANOS 08 e 09, em que são mais evidentes.

4.2.4 Zona AOM

Com base na Figura 4.4, o cenário de COV NSR = \$80/t é o que aporta o melhor VPL para essa zona. A Figura 4.10 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para a sequência isolada de *stopes* selecionados segundo a abordagem tradicional e o cenário de melhor VPL selecionado para a zona segundo a abordagem otimizada.

Figura 4.10 – Sequência isolada de *stopes* selecionados pelo critério da abordagem tradicional e cenário selecionado através da abordagem otimizada para zona AOM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.10 mostra que, para a zona AOM, o melhor cenário segundo a abordagem otimizada alcança resultado de VPL 50% superior quando comparado ao conjunto de *stopes* selecionados segundo o critério da abordagem tradicional. Como o Fator Tonelada possui menor sensibilidade às variações de COV, esse expressivo incremento de valor é obtido à custa de apenas 16% das toneladas, conforme mostra o Fator Tonelada. Como consequência, o NSR do plano otimizado é 7% superior ao do plano segundo abordagem tradicional.

4.3 COMPARAÇÃO GLOBAL – ABORDAGEM TRADICIONAL X ABORDAGEM OTIMIZADA

Para avaliar o impacto global das otimizações de COV por zonas, um plano final foi derivado, integrando o melhor resultado a partir dos diversos subplanos elaborados de acordo com as variações dos COV. A Tabela 4.1 apresenta um resumo do melhor cenário para cada uma das zonas.

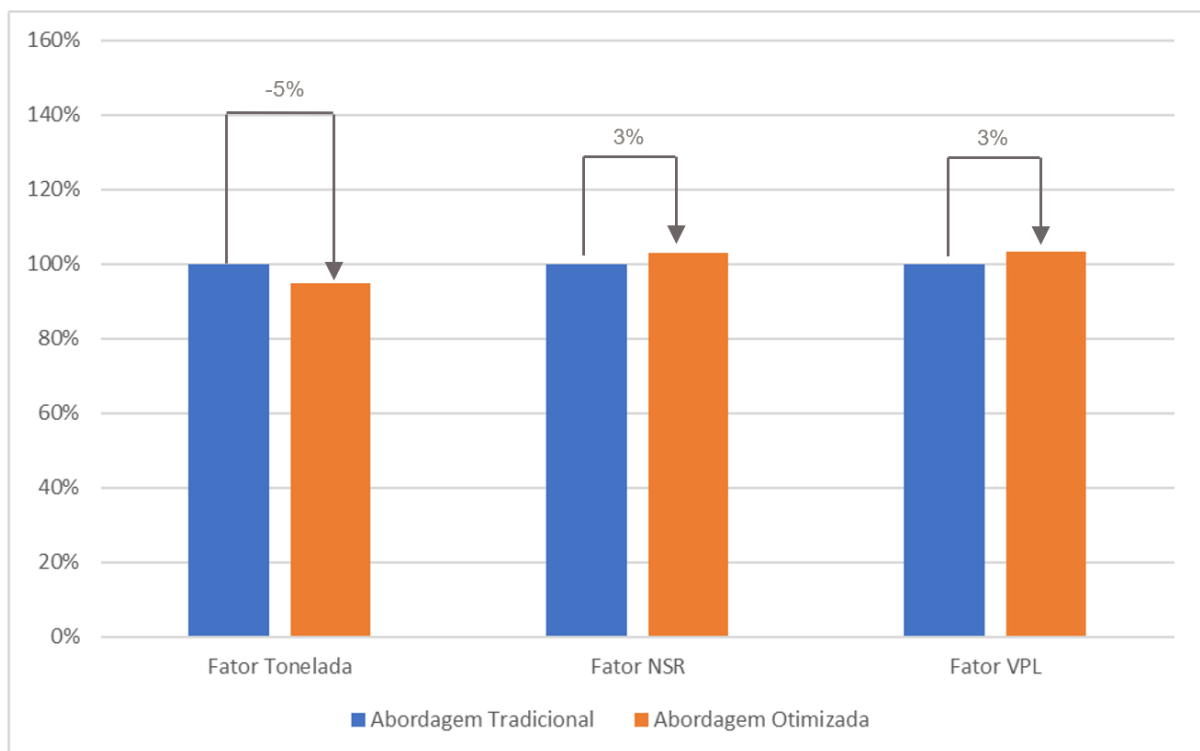
Tabela 4.1 – Seleção de cenário de maior valor para cada zona da mina

| Zona | Cenário de maior VPL (\$/t) |
|------|-----------------------------|
| ACT | 70 |
| AEW | 70 |
| AEX | 70 |
| AOM | 80 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse plano integrado foi, então, comparado ao resultado do plano obtido a partir da abordagem tradicional. Os resultados estão apresentados na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Comparação entre planos segundo abordagem tradicional e abordagem otimizada.



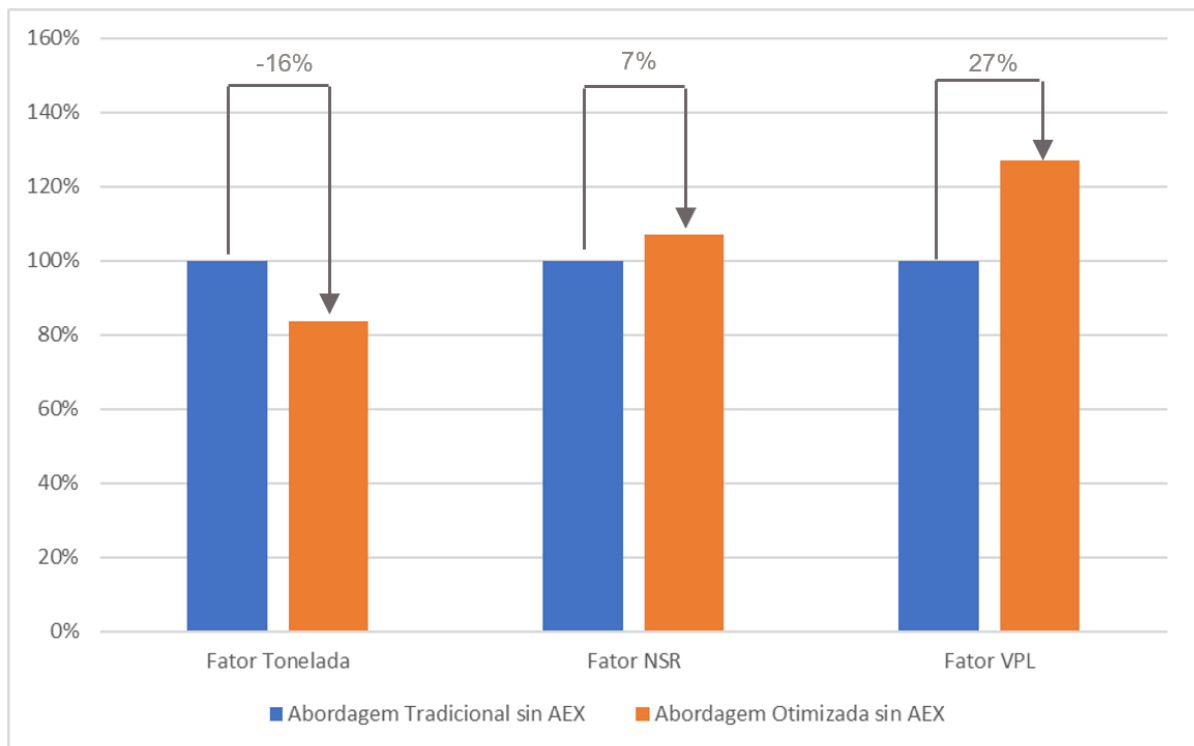
Fonte: Elaborado pelo autor.

O benefício global percebido no Plano Otimizado em relação ao Plano Tradicional foi de 3% para o Fator VPL, que corresponde também ao incremento do Fator NSR. Por outro lado, percebe-se decréscimo do Fator Tonelada em 5%. Ou seja, o Plano Otimizado eliminou da base de *stopes* 5% das toneladas, que correspondiam a 3% de valor potencial sendo perdido.

Uma hipótese possível para explicar o resultado pouco robusto obtido para o Plano Otimizado Global é que a zona AEX, apenas ligeiramente sensível à otimização de COV (Figura 4.8) e que apresenta grande disponibilidade de *stopes*, é capaz de suprir a redução volume de minério nas outras zonas, como resultado do processo de otimização, para atingir um plano com o mesmo nível de produção quando comparado ao Plano Tradicional. Ainda que haja uma diferença de 5% nas toneladas totais, esse resultado é quase integralmente neutralizado ao aplicar-se o método de fluxo de caixa descontado. Para testar essa hipótese, foi realizado, para cada plano, o cálculo do VPL da zona AEX individualmente e, também, das demais zonas quando retirada a zona AEX, sem nenhuma alteração de sequência.

A Figura 4.12 mostra o resultado de VPL para os mesmos planos, porém excluída a zona AEX.

Figura 4.12 – Comparação entre planos segundo abordagem tradicional e abordagem otimizada, excluída a zona AEX.



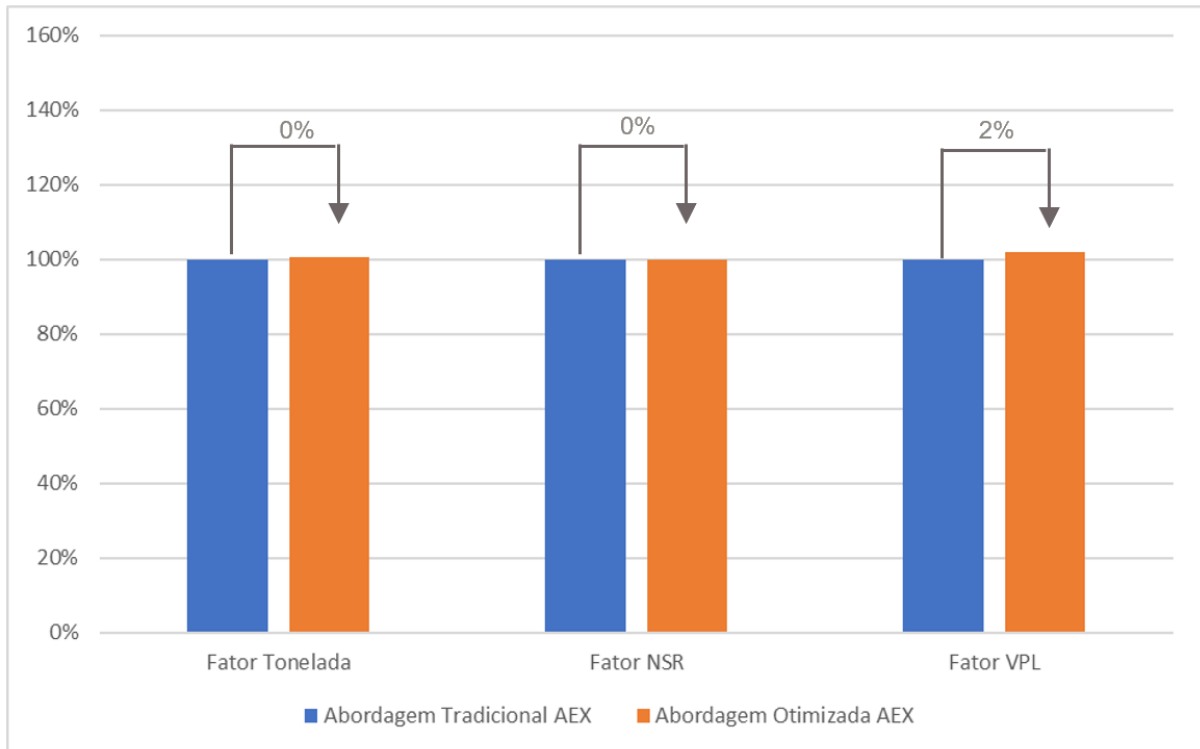
Fonte: Elaborado pelo autor.

A observação do gráfico apresentado na Figura 4.12 permite concluir que a otimização de COV tem impacto positivo nas demais zonas, mesmo quando consideradas em um contexto global em que interagem entre si e competem por

recursos, com Fator VPL apresentando resultado 27% superior ao plano segundo abordagem tradicional, Fator NSR 7% superior e Fator Tonelada 16% inferior.

A Figura 4.13 apresenta o resultado de VPL também para os mesmos planos, porém apenas para a zona AEX.

Figura 4.13 – Comparação entre planos segundo abordagem tradicional e abordagem otimizada, apenas zona AEX.



Fonte: Elaborado pelo autor.

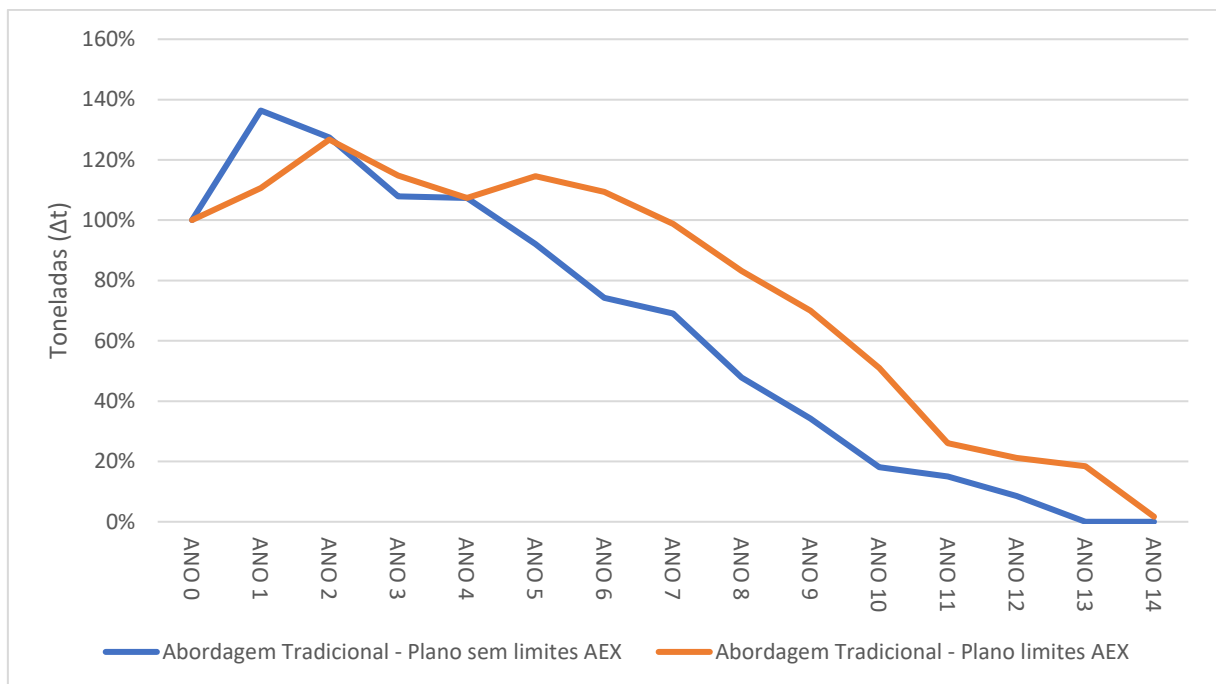
Assim como observado para o sequenciamento isolado apresentado na Figura 4.8, aqui também se percebe comportamento similar para a zona AEX quando integrada em um contexto global da mina. Nesse caso, ainda menos sensível a otimização de COV, com Fator VPL apenas 2% superior para o cenário otimizado e sem alterações nos Fatores NSR e Tonelada.

Para aprofundar o entendimento sobre o impacto da zona AEX no resultado global, tanto o plano segundo a abordagem tradicional quanto o plano integrado segundo a abordagem otimizada foram resequenciados. Para esse exercício, a única premissa ajustada foi o peso da zona AEX no contexto global, ou seja, foi imposto um limite de produção anual proveniente dessa zona. A motivação para este exercício reside no fato de que a zona AEX, atualmente, possui uma real restrição no volume

de produção que é capaz de gerar, seja pela capacidade de carregamento e transporte da frota, seja por restrições relacionadas à capacidade de ventilação. Sendo assim, aproxima os resultados da análise ao cenário de produção real e permite uma avaliação mais apurada das condições atualmente existentes.

A Figura 4.14 apresenta o perfil de produção da zona AEX ilimitada e limitada, comparado em termos percentuais, no cenário da Abordagem Tradicional.

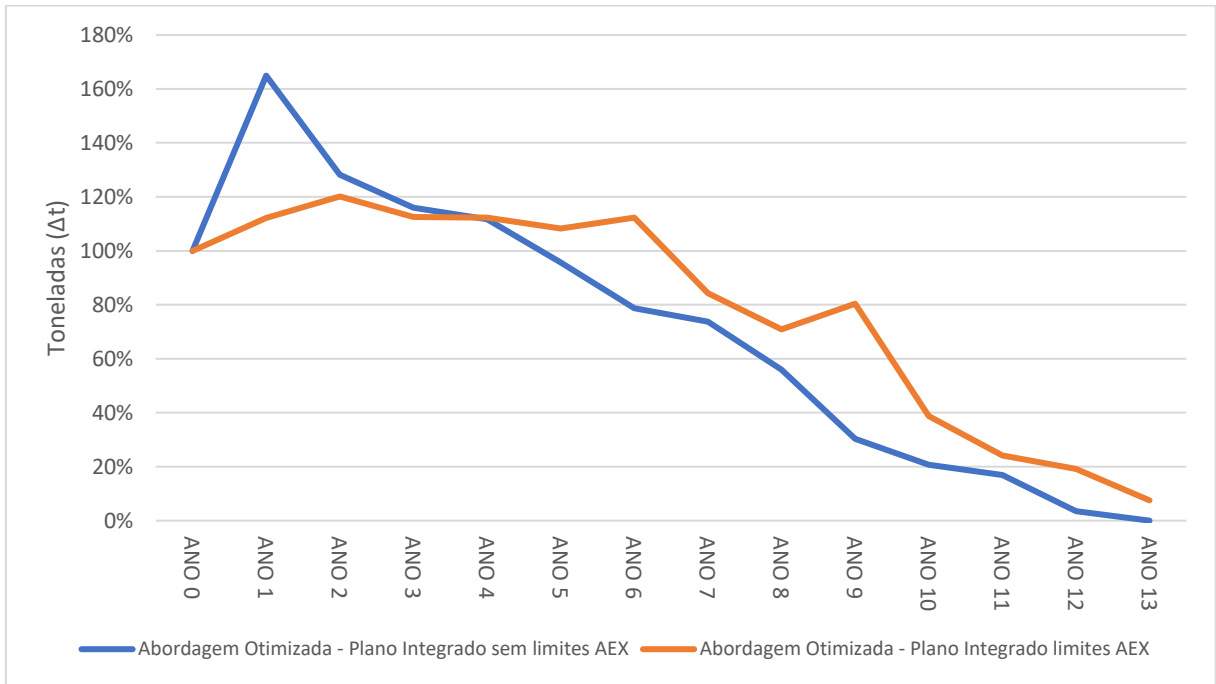
Figura 4.14 – Perfil de Produção – Zona AEX limitada e ilimitada – Abordagem Tradicional



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.15 apresenta o perfil de produção da zona AEX ilimitada e limitada, comparado em termos percentuais, no cenário da Abordagem Otimizada.

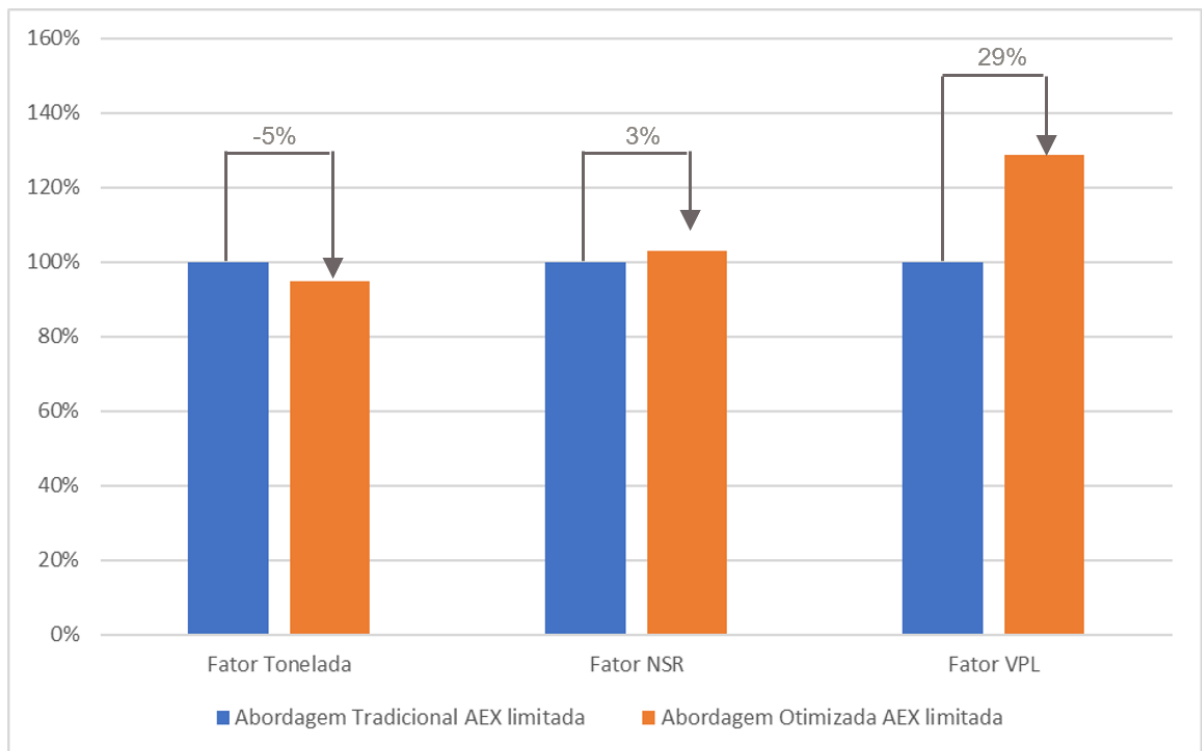
Figura 4.15 – Perfil de Produção – Zona AEX limitada e ilimitada – Abordagem Otimizada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados dessa avaliação estão apresentados na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Comparação entre planos segundo abordagem tradicional e abordagem otimizada como limite de produção anual para zona AEX.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda que se possam observar os efeitos positivos da otimização de COV quando analisados os resultados das demais zonas, excluída a zona AEX, o efeito global é pequeno para o plano global quando não há um limite de produção para a zona AEX. Esse resultado se dá porque as demais zonas juntas somam apenas 30% das toneladas totais do plano. É importante destacar que a zona AEX possui alto NSR médio e é pouco sensível a variações de COV (A zona AEX sozinha representa 75% das receitas de todo o plano). Nesse contexto, tanto o plano otimizado quanto o tradicional puderam alcançar os alvos definidos de produção. Conseqüentemente, e confirmando a hipótese aventada, a zona AEX dilui quase integralmente os benefícios das demais zonas no contexto global em uma análise por fluxos de caixa descontado

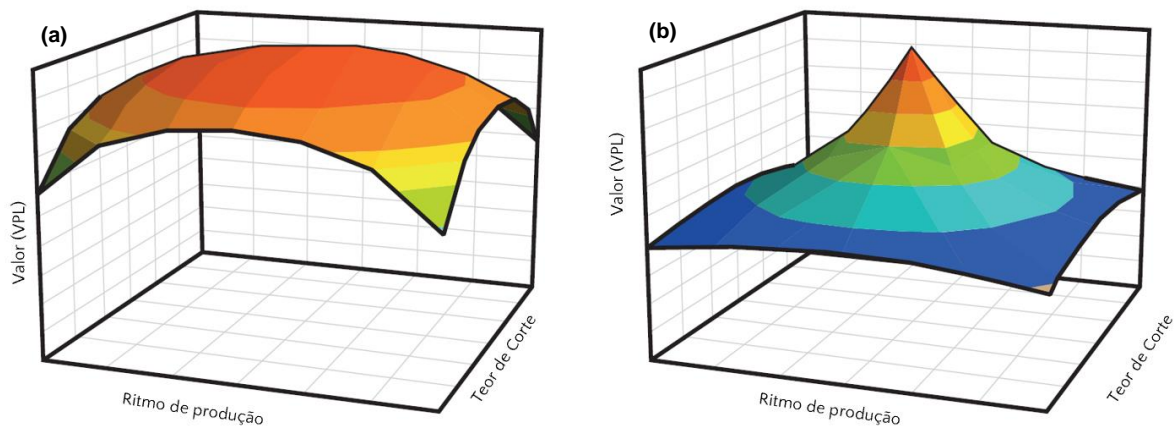
No entanto, ao limitar-se a taxa de produção anual proveniente da zona AEX nos dois planos, percebe-se mais claramente os impactos do processo de otimização, com um Fator VPL percebendo incremento de 29%, Fator NSR de 3% e Fator Tonelada um decréscimo de 5% no plano global segundo a abordagem otimizada, demonstrando como a sequência tem impacto relevante nos resultados de fluxos de caixa.

5 CONCLUSÃO

Este estudo teve por objetivo conduzir a otimização dos teores de corte em uma mina subterrânea. Ainda que os resultados globais tenham sido limitados pela dominância tanto de volume mineral quando em valor contido nos *stopes* da zona AEX, os resultados individuais ou, ainda, os resultados globais quando analisados de forma apartada da zona AEX, apontam para um considerável benefício em conduzir análises de otimização de COV.

Além disso, o entendimento profundo sobre as formas em que é possível extrair valor da mina e as origens desse valor fornecem informações valiosas para definição das estratégias de planejamento e, conseqüentemente, para o alcance das metas corporativas. O resultado obtido nesse trabalho está alinhado com resultados apresentados por Hall (2014), apresentado na Figura 5.1 (a) e (b).

Figura 5.1 – Importância da forma da curva de valor.



Fonte: Hall, 2014. Adaptado pelo autor.

A compreensão do comportamento da curva de valor de uma operação ou de um projeto mineiro para um dado conjunto de premissas financeiras é uma parte crucial da estratégia de otimização. Ainda que a análise tenha sido conduzida apenas em 2D, sem variações dos alvos de produção, esse trabalho permite concluir que a zona AEX apresenta comportamento similar à superfície da Figura 5.1 (a), ou seja, há um amplo platô com um grande leque de opções de COV sem que valor significativo seja, de fato, perdido.

O autor entende que esse comportamento está, provavelmente, associado a zonas (ou minas) de alto teor e disponibilidade mineral. Nesse contexto, é provável

que o tempo e os recursos empregados em conduzir esse processo a cada iteração de planejamento estratégico ou para declaração de reservas não resultem, de fato, em valor adicional sendo gerado para a operação. Em casos como o da zona AEX, uma vez gerada uma curva de valor para um dado conjunto de dados financeiros e premissas de planejamento e notado esse tipo de comportamento, o planejador provavelmente poderia, em iterações futuras, seguir utilizando a abordagem tradicional para o cálculo do COV sem prejuízos à geração de valor. No entanto, os resultados apresentados na Figura 4.16 demonstram que a sequência de produção tem resultado relevante nos resultados de fluxo de caixa, ressaltando ainda mais a relevância de conduzir trabalhos de otimização de teor de corte.

No entanto, as demais zonas da mina subterrânea apresentam comportamento que se assemelham mais à superfície mostrada na Figura 5.1 (b). Nesse contexto, provavelmente associado a corpos minerais de teores médios mais baixos ou marginais, como é o caso das demais zonas apresentadas nesse estudo, pequenos deslocamentos em relação ao ponto considerado ótimo podem implicar em perdas de valor importantes ou, inclusive, destruição de valor.

Esse trabalho se limitou a conduzir avaliações em 2D, demonstrando as relações entre NSR COV e resultados de VPL. Trabalhos futuros poderiam extrapolar a otimização de COV para uma análise 3D, sendo que o terceiro eixo poderia, potencialmente, envolver quaisquer uma das variáveis que têm influência nos resultados de financeiros, por exemplo, os níveis de produção, diluições operacionais, recuperações de lavra, ritmos de avanços de desenvolvimentos e produtividade de equipamentos. Também poderia explorar-se, em trabalhos futuros, a otimização mais profunda daquela apresentada nesse trabalho, levando-a a um nível de detalhes de cada *stope* individualmente, o que poderia também associar-se a avaliações estocásticas de modelos de recursos de forma a quantificar, em um nível muito alto de detalhes, os riscos e os benefícios associados à lavra de cada *stope* ou ao desenvolvimento de uma nova zona da mina.

Ainda assim, em um mercado de mineração global que envolve cifras financeiras muito elevadas em termos de investimentos capitais e gerações de fluxos de caixa, benefícios da ordem de 3% como os encontrados nesse trabalho podem representar dezenas de milhões de dólares e podem representar a diferença de viabilidade ou nível de atratividade em projetos minerais.

6 REFERÊNCIAS

- ANNELS, A. E. **Mineral Deposit Evaluation: A practical approach**. 1991, p. 96-174.
- ATAEI, M.; OSANLOO, M. **Methods for calculation of optimal cutoff grades in complex ore deposits**. Journal of Mining Science, v. 39, p. 499-507, 2003.
- BASCETIN A.; NIETO, A. **Determination of optimal cut-off grade policy to optimize NPV using a new approach with optimization factor**. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 107, n. 2, p. 87-94, 2007.
- CBRR. **Comissão Brasileira de Recursos e Reservas**. 2022.
- CRIRSCO. **International Reporting Template for the public reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves**. Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards, Council of Mining and Metallurgical Institutions. 2019.
- DAGDELEN, K. **An NPV optimization algorithm for open pit mine design**. 24th Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, p. 257-263, 1993.
- GITHIRIA, J.; MUSINGWINI, C. **Comparison of cut-off grade models in mine planning for improved value creation based on NPV**. In: Proceedings of the 6th Regional Conference of the Society of Mining Professors (SOMP), p. 347-362, 2018.
- GOLDIE, R.; TREDGER, P. **Net smelter return models and their use in the exploration, evaluation and exploitation of polymetallic deposits**. Geoscience Canada, 1991.
- HALL, B. **Cut-off grades and optimising the strategic mine plan**. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014.
- HOCKING, R. J.; MOONEY, A. J.; MCFADYEN, L. **Hill of Value financial metrics used to optimise the Carrapateena project**. In: MassMin 2020: Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining. University of Chile, p. 1039-1047, 2020.
- JORC. **Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves**. 2012.
- JOWITT, S. M.; MCNULTY, B. A. **Geology and mining: Mineral resources and reserves: Their estimation, use, and abuse**. SEG Discovery, n. 125. p. 27-36, 2021.
- KING, B. **Transparency in cut-off grade optimization 'clear-cut'**. In: Proceedings of the Strategic Mine Planning Conference, p. 1–10, 2001.
- KRAUTKRAEMER, J. A. **The cut-off grade and the theory of extraction**. Canadian Journal of Economics, vol. 21 (1), p. 146-160, 1988.
- LANE, K. F. **The economic definition of ore: cut-off grades in theory and practice**. COMET Strategy Pty Ltd. 2016.
- LANE, K. F. **The economic definition of ore: cut-off grades in theory and practice**, 1988.

- LANE, K. F. **Choosing the optimum cut-off grade**. Colorado Sch. Min., v. 59, p. pp. 811-829, 1964.
- LASDON, L.S., WARREN, A.D., JAIN, A. and RATNER, M. **Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming** ACM Trans. Math. Software, vol. 4, pp. 34–5, 1978.
- MARTINELLI, R.; COLLARD, J.; GAMACHE, M. **Strategic planning of an underground mine with variable cut-off grades**. Optimization and Engineering, v. 21, p. 803-849, 2020.
- MORTIMER, G. 1950. **Grade control**. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, vol. 59. pp. 1–43.
- OSANLOO, M.; ATAEI, M. **Using equivalent grade factors to find the optimum cut-off grades of multiple metal deposits**. Minerals Engineering, v. 16, n. 8, p. 771-776, 2003.
- PONIEWIERSKI, J.; HALL, B. **Break-even is broken**. AusIMM Bulletin, n. Jun 2016, p. 68-71, 2016.
- PONIEWIERSKI, J.; MACSPORRAN, G.; SHEPPARD, I. **Optimisation of cut-off grade at Mount Isa Mines Limited's enterprise mine**. Proc. 12th Internat. Sympos. Mine Planning and Equipment Selection, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Carlton South, Australia, p. 531-538, 2003.
- RENDU, J. M. **An introduction to cut-off grade estimation**. Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME). 159 P. 2014.
- TAYLOR, H. K. **General background theory of cut-off grades**. Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy, v. 96, n. 2, p. 204-216, 1972.
- THOMPSON, M.; BARR, D. **Cut-off grade: A real options analysis**. Resources Policy, v. 42, p. 83-92, 2014.
- OVALLE, A.; VERA, M. **Optimizing Hill of value for block caving**. In: 3er international symposium on block and sublevel, Chile. p. 442-449, 2014.
- WHITTLE, J.; WHARTON, C. **Optimising cut-off grades**. Mining Magazine, v. 173, n. 5, p. 287-9, 1995.