

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos
Minerais

Eduardo Pinheiro Felix

IMPACTOS DA DEFINIÇÃO DO TEOR DE CORTE NO MODELAMENTO DE ENVOLTÓRIAS
DE TEOR E ESTIMATIVA DE RECURSOS DE UM DEPÓSITO DE COBRE

Belo Horizonte

2025

Eduardo Pinheiro Felix

**IMPACTOS DA DEFINIÇÃO DO TEOR DE CORTE NO MODELAMENTO DE ENVOLTÓRIAS
DE TEOR E ESTIMATIVA DE RECURSOS DE UM DEPÓSITO DE COBRE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Programa de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Alves Campos

Belo Horizonte

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO MONOGRAFIA/ARTIGO

Aos vinte e oito dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, às 09h:50 , o estudante Eduardo Pinheiro Felix, matrícula 2024670274, defendeu o Trabalho intitulado “**IMPACTOS DA DEFINIÇÃO DO TEOR DE CORTE NO MODELAMENTO DE ENVOLTÓRIAS DE TEOR E ESTIMATIVA DE RECURSOS DE UM DEPÓSITO DE COBRE**”.

Participaram da banca examinadora os professores abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 88

Situação: Aprovado

Orientador: Professor Pedro Henrique Alves Campos

Examinador: Professor Pedro Benedito Casagrande

Examinador: Professor Leandro de Azevedo da Silva



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Henrique Alves Campos, Professor do Magistério Superior**, em 14/08/2025, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Azevedo da Silva, Usuário Externo**, em 18/08/2025, às 08:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Benedito Casagrande, Subchefe de departamento**, em 18/08/2025, às 12:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 4444993 e o código CRC 5F25903B.

INSTRUÇÕES

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

RESUMO

O estudo avalia o impacto do teor de corte de modelagem na estimativa de recursos minerais em um depósito real do tipo IOCG de Cobre (Iron Oxide Copper Gold). A análise consiste na análise da variação de envoltórias de teor, modelados com diferentes teores de corte, entre 0,05% e 1,00% de Cu, mantendo constante a envoltória de alto teor. Foram utilizados dados de sondagem e técnicas de modelagem implícita no software Leapfrog Geo. Os resultados demonstram que, à medida que se aumenta o teor de corte, observa-se uma redução progressiva da massa e do metal contido, enquanto o teor médio aumenta. Contudo, nos intervalos abaixo de 0,15% e acima de 0,85% de Cu, as variações tornam-se menos expressivas, indicando estabilização dos parâmetros. Os cenários entre 0,10% e 0,20% revelaram ganhos potenciais de metal contido, embora acompanhados por aumento proporcionalmente superior na massa total do recurso. Conclui-se que o ajuste do teor de corte deve considerar não apenas os valores de teor, mas também aspectos geológicos, de modo a preservar a coerência do modelo com a realidade do depósito.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Implícita; Teor de Corte; Recurso Mineral; Depósito de Cobre.

ABSTRACT

The study evaluates the impact of modeling cut-off grade on mineral resource estimation in a real IOCG-type Copper deposit (Iron Oxide Copper Gold). The analysis focuses on the variation of grade shells modeled with different cut-off grades, ranging from 0.05% to 1.00% Cu, while keeping the high-grade envelope constant. Drilling data and implicit modeling techniques using Leapfrog Geo software were employed. The results show that as the cut-off grade increases, there is a progressive reduction in both mass and contained metal, while the average grade increases. However, in the intervals below 0.15% and above 0.85% Cu, variations become less significant, indicating parameter stabilization. Scenarios between 0.10% and 0.20% revealed potential gains in contained metal, although accompanied by a proportionally greater increase in the total resource mass. It is concluded that cut-off grade adjustments should consider not only grade values but also geological aspects, in order to preserve the coherence of the model with the deposit's geological reality.

KEYWORDS: Implicit Modeling; Cut-off Grade; Mineral Resource; Copper Deposit.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 MATERIAL E MÉTODOS	8
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
4 CONCLUSÕES	13
5 AGRADECIMENTOS	14

1 INTRODUÇÃO

A definição de um recurso mineral é um processo complexo que envolve diversas áreas de estudo, e inicialmente envolve a definição de domínios, que são fundamentados em fatores geológicos e estatísticos.

Para definir os domínios é necessário conhecer e representar adequadamente a mineralização (COOMBES, 2008). Os domínios de estimativa devem ser consistentes com as características espaciais e geológicas, sendo identificáveis nos dados de perfuração e/ou produção.

Em uma revisão sobre a avaliação da incerteza em modelos de domínio de recurso McManus *et al.* (2021) observaram que os métodos geoestatísticos são incapazes de medir a incerteza interpretativa ou conceitual do modelo geológico utilizado para estabelecer o domínio de recursos. Em essência, o que parece ser a etapa mais arriscada na modelagem de recursos não pode ser quantificado. A indústria de mineração atualmente carece de uma solução para esse problema significativo (REID; COWAN, 2023).

A distribuição espacial dos teores dentro dos domínios deve exibir propriedades estatísticas consistentes, e isso não significa que os teores são constantes dentro desses domínios, no entanto, as propriedades geológicas e estatísticas dos teores facilitam sua estimativa (ROSSI; DEUTSCH, 2014). A estacionariedade é uma propriedade do modelo de função aleatória (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989) e não uma propriedade intrínseca da variável, é uma decisão tomada pelo responsável pelo modelamento e estimativa do recurso mineral e é necessário realizar inferências e assumir premissas.

Uma prática comum na indústria é o modelamento de envoltórias de teor (*Grade Shell*), geralmente realizadas dentro de unidades geológicas e mineralogia conhecida, a fim de individualizar zonas de mais alto teor da variável de interesse. Esse método é geralmente realizado através da análise estatísticas do histograma e outras ferramentas gráficas da variável de interesse e é bastante dependente da experiência do profissional e das premissas adotadas, podendo resultar em teores de corte arbitrários e gerando incertezas nos limites dos domínios (EMERY; ORTIZ, 2005).

Com esta problemática, o presente estudo pretende abordar o impacto que o teor de corte de modelagem tem nos recursos minerais. Realizando o modelamento de envoltórias de teores (*Grade Shell*) de um mesmo recurso em diferentes teores de corte e avaliando o impacto na geometria e em uma segunda etapa, realizando a estimativa de teores desses diferentes cenários para avaliar o impacto no inventário mineral.

O estudo de caso será realizado em um depósito real de cobre do tipo IOCG, o nome do depósito e empresa serão preservados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A base de dados utilizada apresenta aproximadamente 58.000 metros de sondagem e 22.500 amostras, sendo amostrada com tamanho máximo de 1,50m nas zonas mineralizadas e 4,00 metros nas regiões de estéril, todas as amostras foram analisadas por laboratórios certificados. Os furos de sondagem diamantada apresentam profundidade média de 350 metros e estão distribuídas por toda extensão do depósito.

O cenário base consiste em um modelo de teores de baixo teor modelado utilizando um teor de corte de 0,20% e teor médio de 0,57% de Cobre e de um modelo de alto teor modelado utilizando um teor de corte de 1,00% e teor médio de 2,24% de Cobre, esses valores de teor médio levam em consideração as amostras originais. Os valores de densidade, variografia e parâmetros de busca serão os mesmos para todos os cenários analisados.

Para a realização dos cenários de modelagem de teores (grade shell), foi utilizado o software Leapfrog Geo, que utiliza o método de modelagem implícita utilizando a função de base radial (RBF) como interpolador. Partindo do cenário base (Figura 1), com teor de modelagem de 0,20% de Cu para o baixo teor e teor de modelagem de 1,00% para o alto teor, foram criados cenários de modelagem da envoltória de baixo teor desde 0,05% de Cu até 1,00% de Cu, exemplificado na Figura 2 onde a partir de um modelo de blocos podemos visualizar as 20 envoltórias sobrepostas, onde as de mais alto teor estão contidas no teor imediatamente inferior (ex. envoltória de 0,25% está contida na envoltória de 0,20%). A envoltória de alto teor foi mantida em todos os cenários, uma vez que ela está encaixada em uma estrutura geológica conhecidamente diferente e estruturalmente controlada, assim evitando que haja um espalhamento desses teores para a região de baixo teor disseminado.

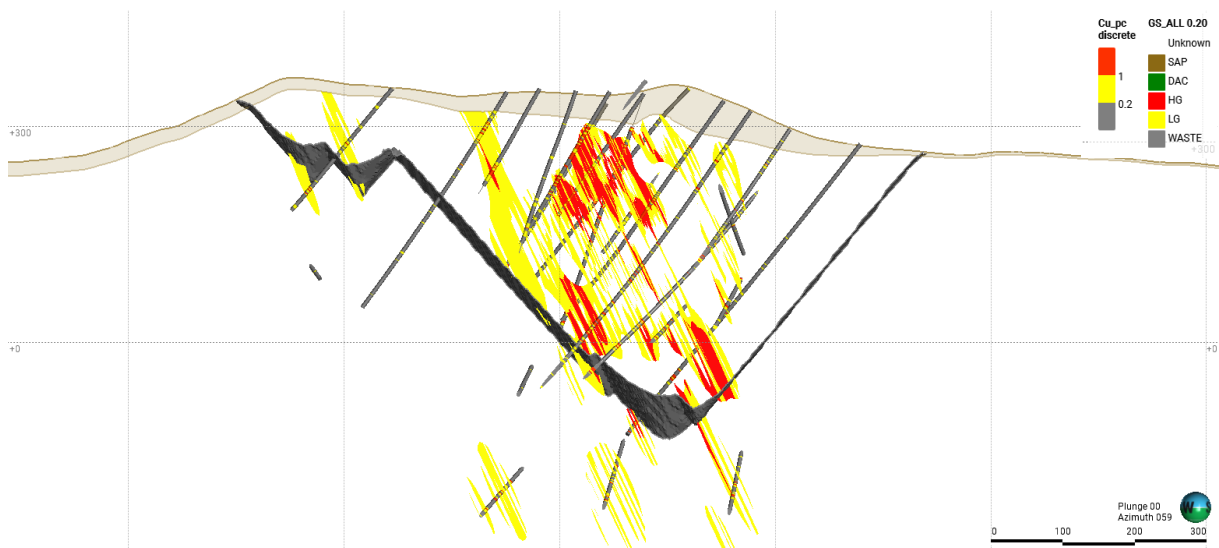


Figura 1: Seção tipo do cenário base, com envoltória de baixo teor (0,20% Cu) em amarelo e alto teor (1,00% Cu) em vermelho.

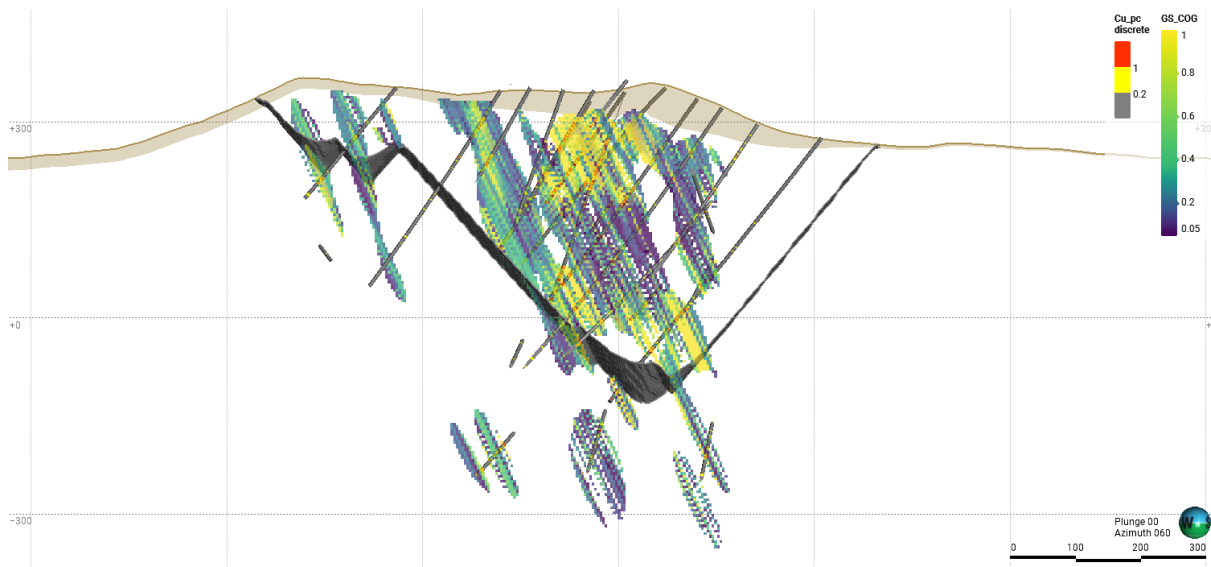


Figura 2: Modelo de blocos da seção tipo destacando os blocos dentro das envoltórias de teor entre 0,05% e 1,00% Cu.

Para restringir a avaliação a uma zona já conhecida e delimitada, foi utilizado o a cava de recurso baseada no modelo de 0,20% de Cu para baixo teor de 1,00% de Cu para alto teor, todos os cálculos de tonelagem, teor e metal contido realizados posteriormente foram realizados dentro dessa cava utilizando o teor de corte para cubagem em 0,20% de Cu. Foram adotadas densidades médias para os litotipos de rochas estéreis e encaixantes, para as litologias de minério foram realizadas regressões lineares baseadas no teor de Cobre e Ferro estimados.

Os horizontes de oxidação foram modelados a parte e utilizados igualmente em todos os cenários. Para esse trabalho serão considerados apenas os blocos classificados como recurso medido, indicado e inferido para as análises.

As estimativas foram realizadas utilizando a base de dados regularizada em compostas de 1,50m dentro da zona mineralizada e os resíduos menores que 0,75m foram descartados. Foi utilizada o interpolador da krigagem ordinária para as estimativas de teores, realizadas em quatro passadas, e os mesmos parâmetros foram utilizados em todos os cenários avaliados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com produtos executados e as cubagens realizadas, foram realizadas análises comparativas entre cada um dos cenários e que foram agrupadas na tabela 1, onde foram avaliados por teor de corte a massa, teor médio, metal contido de Cobre e suas diferenças em quilo toneladas e percentual (%), além da diferença relativa de ganhou ou perda de metal contido em relação a faixa de teor imediatamente anterior. Todas as análises na tab. 1 estão realizadas em relação ao cenário base de 0,20% de Cu para a envoltória de baixo teor que está destacado em negrito.

Tabela 1: Integração dos cenários de modelagem variando o teor de corte de modelagem

Cuf-off (%)	Massa (kt)	Teor Médio (%)	Metal Contido (kt)	Dif, Massa (kt)	Dif, massa (%)	Dif, Metal Cont, (kt)	Dif, Metal Cont (%)	Dif, Relativa Metal Cont, (%)
0,05	93 164,75	0,65	602,00	19997,94	27,33%	32,93	5,79%	0,00%
0,10	90 958,48	0,66	604,01	17791,68	24,32%	34,93	6,14%	0,33%
0,15	84 492,64	0,70	594,29	11325,83	15,48%	25,22	4,43%	-1,61%
0,20	73 166,81	0,78	569,07	0,00	0,00%	0,00	0,00%	-4,24%
0,25	60 254,83	0,88	530,30	-12911,98	-17,65%	-38,77	-6,81%	-6,81%
0,30	49 996,60	0,99	494,09	-23170,21	-31,67%	-74,98	-13,18%	-6,83%
0,35	41 747,80	1,10	458,87	-31419,01	-42,94%	-110,20	-19,37%	-7,13%
0,40	36 625,78	1,18	433,22	-36541,02	-49,94%	-135,85	-23,87%	-5,59%
0,45	32 132,89	1,28	410,19	-41033,92	-56,08%	-158,88	-27,92%	-5,32%
0,50	28 872,68	1,35	390,69	-44294,13	-60,54%	-178,38	-31,35%	-4,75%
0,55	25 848,69	1,43	369,19	-47318,11	-64,67%	-199,89	-35,12%	-5,50%
0,60	23 508,35	1,50	352,87	-49658,45	-67,87%	-216,20	-37,99%	-4,42%
0,65	21 298,60	1,57	333,36	-51868,20	-70,89%	-235,71	-41,42%	-5,53%
0,70	19 642,03	1,63	319,33	-53524,77	-73,15%	-249,75	-43,89%	-4,21%
0,75	17 797,41	1,69	301,25	-55369,40	-75,68%	-267,82	-47,06%	-5,66%
0,80	16 308,18	1,77	287,93	-56858,63	-77,71%	-281,14	-49,40%	-4,42%
0,85	15 094,88	1,82	274,72	-58071,93	-79,37%	-294,35	-51,72%	-4,59%
0,90	14 067,35	1,88	264,77	-59099,46	-80,77%	-304,30	-53,47%	-3,62%
0,95	13 242,23	1,94	257,00	-59924,58	-81,90%	-312,07	-54,84%	-2,94%
1,00	12 192,90	2,00	244,28	-60973,90	-83,34%	-324,79	-57,07%	-4,95%

Avaliando a redução no metal contido nas diferentes faixas de teor de corte de modelagem, é possível observar na tab. 1 e na figura 3 que nos cenários utilizando os teores mais baixo, entre 0,05% e 0,10% Cu e acima de 0,85% de Cu, não há ganhos ou perdas relevantes na quantidade de metal contido no modelo.

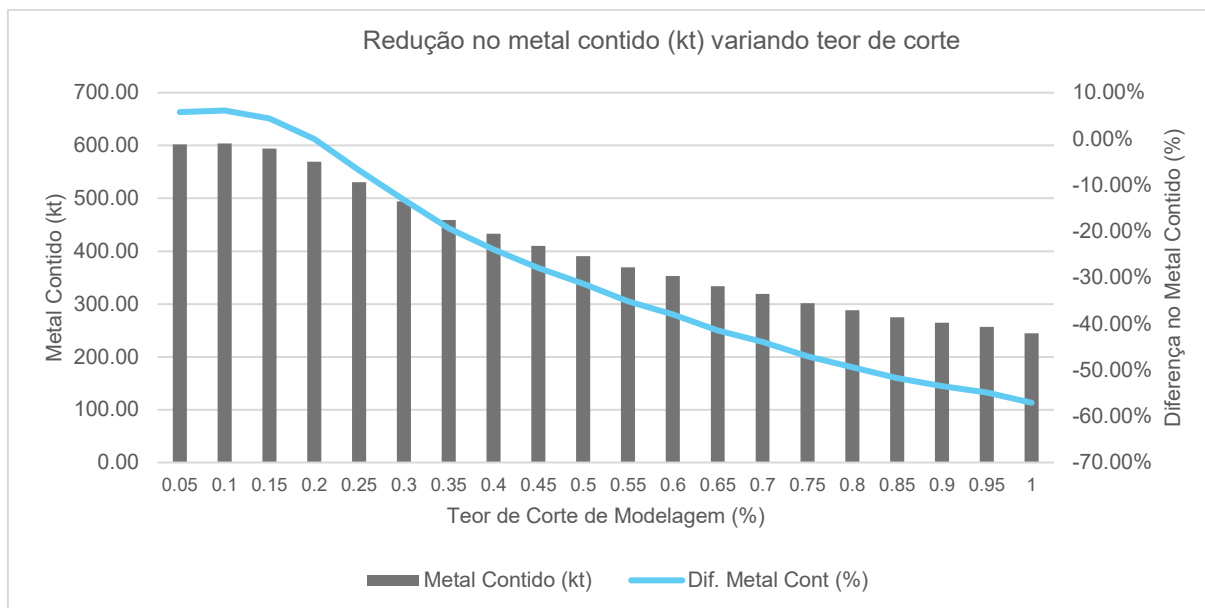


Figura 3: Gráfico apresentando metal contido e variação percentual em relação ao cenário base de 0,20% de Cu

A variação de metal contido à medida que o teor de modelagem aumenta, varia entre ganhos de até 7,16% e perdas de -8,48%, em média ficando em 3,84% de variação como mostrado na figura 4. As maiores variações estão próximas aos extremos, e variações próxima a média são observadas entre teores de corte de 0,25% e 0,85%, onde as reduções entre faixa de teores são estáveis e próximas a 4,00%.

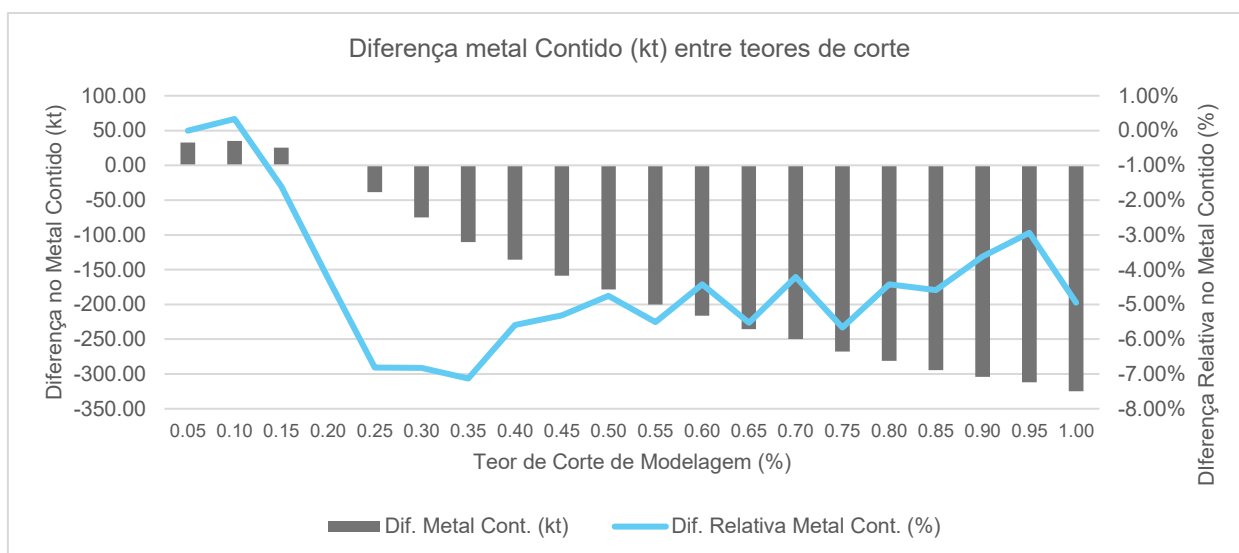


Figura 4: Gráfico apresentando metal contido e variação percentual em relação ao cenário base de 0,20% de Cu

Como esperado à medida que o teor de corte de modelagem aumenta temos um aumento do teor médio do recurso e uma redução no metal contido, e que mais uma vez ficam evidenciados que nos extremos temos variações mais acentuadas, onde abaixo de 0,10% de Cu e acima de 0,85%, os valores sofrem variações mais abruptas e pós essas faixas estabilizam, como mostrado na imagem 5.

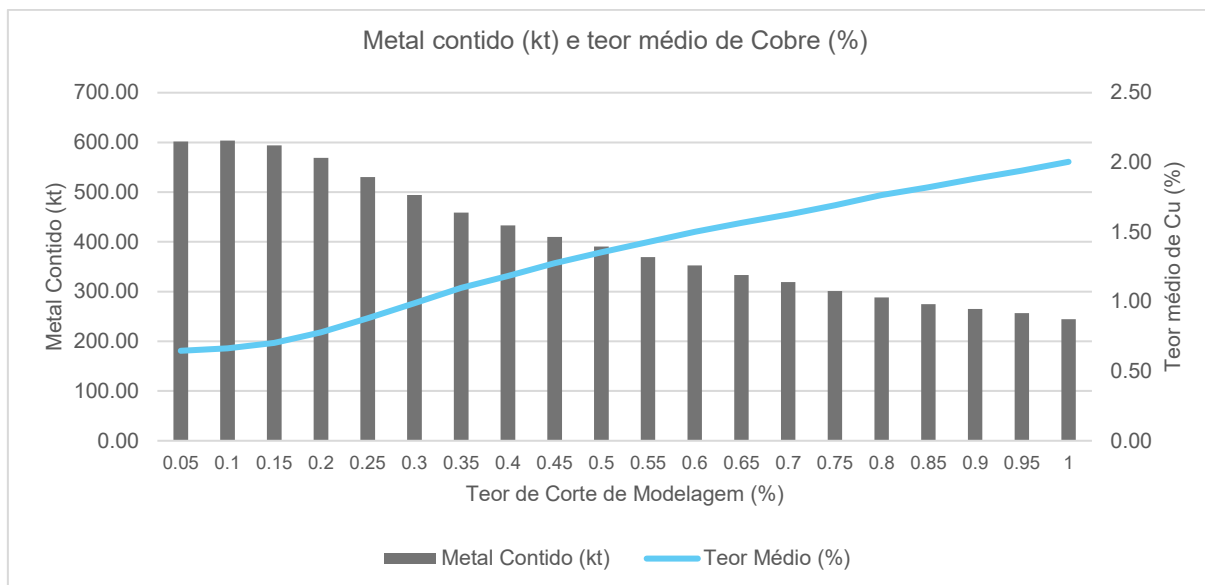


Figura 5: Gráfico apresentando metal contido e o teor médio de Cu do modelo variando de acordo com o teor de modelagem.

Avaliando a massa total juntamente com a quantidade de metal contido (Figura 6), observamos que a massa total apresenta uma queda constante à medida que aumentamos o teor de corte de modelagem, com os extremos apresentando uma queda menos acentuada. Já o metal contido apresenta um comportamento ligeiramente diferente, apresentando pequenos ganhos à medida que se aumenta o teor de corte de 0,05% para 0,10%, e a partir desse ponto apresenta uma queda constante no metal contido até atingir a estabilidade em 0,85%, onde as perdas ocorrem em menor proporção.

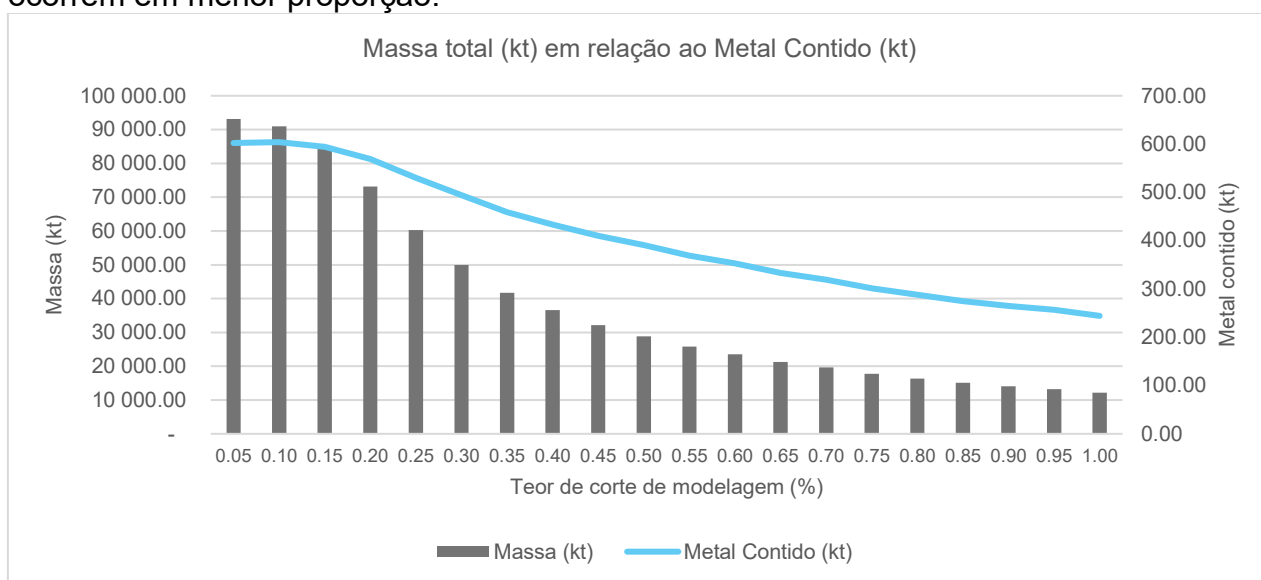


Figura 6: Gráfico apresentando a massa e metal contido do modelo variando de acordo com o teor de modelagem.

4 CONCLUSÕES

Comparando os cenários produzidos com o cenário base, observamos uma tendência de queda tanto da massa como do metal contido à medida que se aumenta o teor de corte de modelagem, no entanto as reduções do teor de modelagem de 0,20% de Cu para 0,10% de Cu podem ser interessantes, uma vez que adiciona metal contido acima do teor de corte, apesar do incremento da massa ser percentualmente superior ao do metal contido.

Para esse estudo de caso, quando avaliamos os cenários abaixo de 0,15% de Cu e acima de 0,85% de Cu, não observamos incrementos e perdas significantes de massa, metal contido e de teor, ocorrendo uma estabilização desses parâmetros.

O modelamento de envoltórias de teores, apesar de ser uma prática comum na indústria, pode resultar em impactos significados nos resultados dos recursos minerais a depender do teor de corte utilizado. A definição do teor de modelagem de forma arbitrária pode afetar negativamente a estimativa de tonelagem, teor, metal contido, sua extensão espacial e introdução de incertezas e inconsistências.

Os domínios definidos por intervalos de teor não são totalmente independentes entre si, devido a continuidade espacial dos teores no depósito, gerando inconsistências especialmente nas bordas das envoltórias.

Essa abordagem de modelamento pode ser útil para separar áreas mineralizadas de estéreis, mas é importante realizar uma avaliação cuidadosa do teor de corte a ser utilizado a fim de respeitar as informações geológicas, buscando respeitar e representar as características genéticas e geométricas do depósito mineral.

5 AGRADECIMENTOS

A empresa SDPM Mining Consulting pela disponibilização da infraestrutura e softwares utilizados.

REFERÊNCIAS

COOMBES, J. **The art and science of resource estimation: a practical guide for geologists and engineers**. Subiaco, Australia: Coombes Capability, 2008.

EMERY, X.; ORTIZ, M. J. Estimation of mineral resources using grade domains: critical analysis and a suggested methodology. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 105, p. 247–255, 2005.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

MCMANUS, S. et al. Uncertainty assessment of spatial domain models in early stage mining projects – A review. **Ore Geology Reviews**, v. 133, p. 104098, jun. 2021.

REID, R. J.; COWAN, E. J. Towards quantifying uncertainties in geological models for mineral resource estimation through outside-in deposit-scale structural geological analysis. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 70, n. 7, p. 990–1009, 3 out. 2023.

ROSSI, M. E.; DEUTSCH, C. V. **Mineral Resource Estimation**. 1. ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.