

## APLICAÇÃO DE MINERADORES CONTÍNUOS DE SUPERFÍCIE NA LAVRA DE XISTO BETUMINOSO DE SÃO MATEUS DO SUL - PR

Jaime Dias Filho<sup>1</sup>

Carlos Arroyo<sup>2</sup>

Adilson Curi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mestrando, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Escola de Minas - PPGEM

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Escola de Minas,

### RESUMO

Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo de viabilidade técnica para um novo modelo de lavra de folhelho (xisto) pirobotuminoso, utilizando equipamentos mineradores contínuos de superfície na mineração de xisto da Unidade de Industrialização do Xisto – SIX – da PETROBRAS S.A., localizada no município de São Mateus do Sul, no estado do Paraná. Trata-se de um subsídio técnico inicial para a avaliação da possibilidade de aplicação futura desses equipamentos em substituição ao modelo de lavra atualmente praticado, que utiliza o método por tiras com escavadeira de caçamba de arrasto Dragline Bucyrus Marion 7800. Foram identificadas perdas de minério no modelo de lavra com escavadeira Dragline para as duas camadas de minério presentes na mina. Também foi calculado o aumento da jazida lavrável, decorrente da característica de lavra seletiva dos equipamentos mineradores contínuos de superfície, considerando diferentes espessuras de camadas de xisto. Como resultado, foram realizadas reanálises das variáveis estratégicas globais do negócio de mineração de xisto, como a relação estéril/minério e o percentual de recuperação da jazida

**Keywords:** Estudo de viabilidade, mineradores contínuos de superfície, mineração de folhelho pirobotuminoso.

### RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo presentar un estudio de viabilidad técnica para un nuevo modelo de explotación de esquisto pirobotuminoso, utilizando equipos mineros continuos de superficie en la minería de esquisto de la Unidad de Industrialización del Esquisto – SIX – de PETROBRAS S.A., ubicada en el municipio de São Mateus do Sul, en el estado de Paraná. Se trata de un subsidio técnico inicial para la evaluación de la posibilidad de aplicación futura de estos equipos en sustitución del modelo de explotación actualmente practicado, que utiliza el método por franjas con excavadora de cuchara de arrastre Dragline Bucyrus Marion 7800. Se identificaron pérdidas de mineral en el modelo de explotación con excavadora Dragline para las dos capas de mineral presentes en la mina. También se calculó el aumento de la reserva explotable, derivado de la característica de explotación selectiva de los equipos mineros continuos de superficie, considerando diferentes espesores de capas de esquisto. Como resultado, se realizaron nuevos análisis de las variables estratégicas globales del negocio de la minería de esquisto, como la relación estéril/mineral y el porcentaje de recuperación de la reserva.

**Palabras Clave:** Estudio de viabilidad, mineros continuos de superficie, minería de esquisto pirobotuminoso.

### 1. INTRODUÇÃO

O atual modelo de lavra de folhelho (xisto) pirobotuminoso da Unidade de Industrialização do Xisto – SIX – é realizado pelo método de lavra por tiras, utilizando uma escavadeira de

caçamba de arrasto Dragline Bucyrus Marion 7800 (Figuras 01(a) e 02), com mais de 50 anos de operação, baixa disponibilidade mecânica e elevados custos operacionais e de manutenção em comparação às médias observadas em outras escavadeiras Draglines ao redor do mundo.

Diante das dificuldades relacionadas à confiabilidade da máquina, identificou-se a oportunidade de realizar um estudo de viabilidade técnica preliminar visando à mudança do modelo de lavra atualmente empregado na mineração de xisto.

Esse estudo envolveu uma ampla pesquisa de mercado para identificar outras opções tecnológicas de equipamentos com potencial para substituir a escavadeira Dragline.

Como condição fundamental para a aplicação do método de lavra a céu aberto por tiras, destaca-se a forma e a posição do maciço rochoso, que deve ser preferencialmente tabular e composto por camadas com pouca inclinação. Independentemente da resistência mecânica do maciço, o método pode ser aplicado a qualquer tipo de rocha, desde que o depósito apresente grande extensão lateral, continuidade e uniformidade (Pfleider, 1968, 1973a, apud Hartman, 1987; Anon, 1976a, 1979c, apud Hartman, 1987).

Considerando a predisposição geológica da jazida de xisto da SIX — caracterizada por ser um depósito acamado, sub-horizontal, tabular e de grande extensão longitudinal — identificou-se a tecnologia de mineração contínua de superfície como a alternativa mais promissora para o desenvolvimento do novo modelo de lavra. Dessa forma, propôs-se a substituição do

modelo atual pelo método de lavra por tiras utilizando mineradores contínuos de superfície.

Adicionalmente, observou-se a aplicação bem-sucedida dessa tecnologia na mineração de bauxita no estado do Pará, onde três equipamentos mineradores contínuos de superfície do fabricante Wirtgen (Figura 01(b)), modelo 2500SM, estão em operação, sendo considerados ideais para adaptação à mina de xisto da SIX.

Segundo Wirtgen (2010), os mineradores contínuos de superfície realizam a operação de corte e fragmentação da rocha “in situ” em uma única etapa, por meio de desmorte mecânico. Essa tecnologia elimina imediatamente várias operações unitárias de mina, como perfuração e desmorte com explosivos, carregamento de caminhões e britagem primária no tratamento de minérios. Destaca-se ainda pela capacidade de realizar lavra seletiva das camadas, maximizando o aproveitamento da jazida.

Ao compatibilizar as resistências à compressão simples das rochas da mina de xisto com a faixa de aplicação dos mineradores contínuos de superfície, verificou-se que as tensões das rochas da mina giram em torno de 100 MPa — dentro da faixa de aplicação econômica desses equipamentos, que operam eficientemente até 130 MPa (Wirtgen, 2010).

(a)



Escavadeira *Dragline Bucyrus Marion 7800*

(b)



Mineradores contínuos de superfície *Wirtgen 2500 SM*

Figura 01 Método atual de lavra com Escavadeira *Dragline Bucyrus Marion 7800* (a)

e nova proposta de lavra com mineradores contínuos de superfície 2500SM Wirtgen (b).

## 2

## . MATERIAIS E MÉTODOS

As tiras de lavra possuem dimensões de 2.500 metros de comprimento por 25 metros de largura, sendo subdivididas em blocos com 50 metros de comprimento por 25 metros de largura. As alturas das tiras — e, conseqüentemente, dos blocos — são determinadas pelas espessuras das camadas de estéril e de minério. Acima da camada de xisto superior, encontra-se a camada de capeamento, com 16 metros de espessura, composta por argilas e siltitos. Entre as camadas de xisto superior e inferior, com espessuras de 6,3 metros e 3,2 metros, respectivamente, está localizada a camada intermediária, com 8 metros de espessura, constituída por calcários e siltitos.

A camada de capeamento e a intermediária são desmontadas com uso de explosivos previamente às escavações realizadas pela escavadeira Dragline, que executa a remoção simultânea dessas camadas de estéril, liberando as camadas de xisto (minério) para as operações subseqüentes de perfuração, desmonte de rochas, escavação e carregamento em caminhões. A lavra das camadas de xisto é realizada simultaneamente, obedecendo à proporção de duas massas de xisto superior para uma de xisto inferior, a fim de atender às especificações da unidade de tratamento de minérios e da planta industrial. O estéril da tira subseqüente é removido pela Dragline e depositado na tira previamente lavrada (Curi, 2017), da qual já foram extraídas as camadas de

minério. A atividade de recuperação das áreas mineradas ocorre de forma concomitante com as operações de lavra (Figura 02).

Para este estudo, adotou-se como premissas — com base na constatação de perdas de minério por meio do acompanhamento da espessura *in situ* versus a espessura efetivamente lavrada — que a perda média no topo da camada de xisto superior é de 0,5 metro, e na base da camada de xisto inferior é de 0,8 metro. Os teores de óleo presentes nos minérios, determinados por ensaios FISCHER conforme a norma ASTM D3904-80 em laboratório, apresentam decréscimo do topo para a base das camadas. A camada de xisto superior apresenta um teor médio de óleo de 9%, sendo que seu topo (0,5 metro) possui o maior teor, com 12%. A camada de xisto inferior tem teor médio de 12%, mas sua base (0,8 metro) apresenta o menor teor, de 6%, sendo esta porção considerada estéril por comprometer as especificações de óleo exigidas pela planta industrial, cliente da operação de mineração. Com a possibilidade de aproveitamento do topo da camada de xisto superior por meio da lavra seletiva proporcionada pelos mineradores contínuos de superfície, a base da camada de xisto inferior — mesmo com menor teor de óleo — passa a ter potencial de aproveitamento como ROM (Run of Mine), agregando à jazida da SIX uma massa significativa de minério anteriormente descartada.

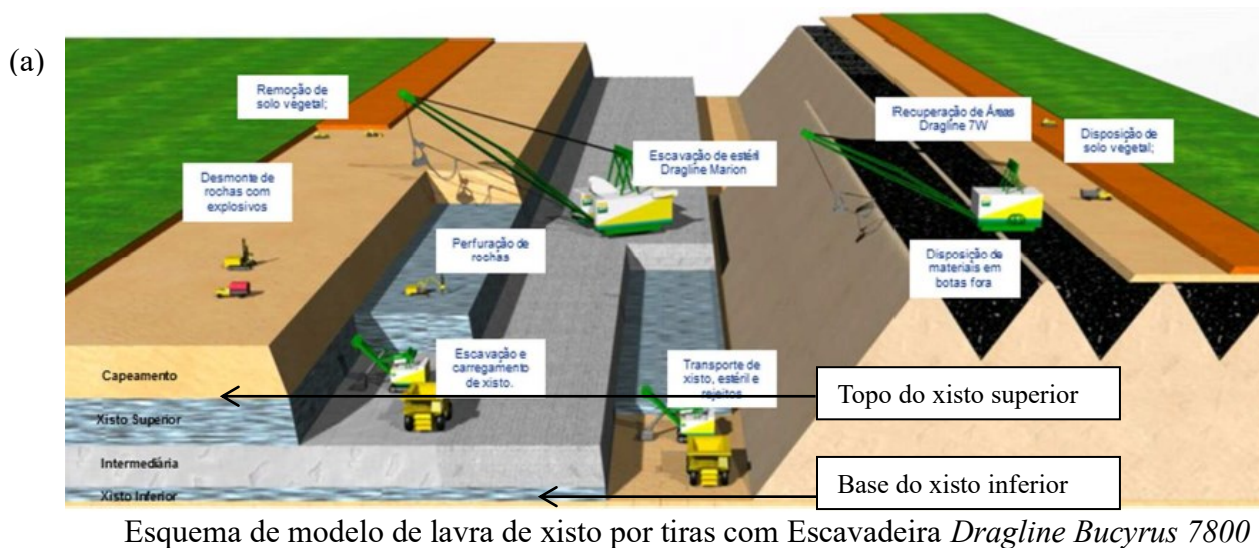


Figura 02 Mineração de xisto da SIX com destaque para topo de xisto superior e base de xisto inferior objetos de estudo.

Dada a grande importância de se preservar um recurso limitado e não renovável — a jazida de minério — conforme destacado pela U.S. Energy Information Administration (EIA, 2018), e adotando-se a premissa da extração completa do minério disponível, este estudo prioriza o conceito de desenvolvimento sustentável na mineração. De acordo com o World Wide Fund for Nature (WWF, 2018), desenvolvimento sustentável é aquele capaz de suprir as necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade das futuras gerações de suprirem as suas próprias necessidades, ou seja, trata-se de um desenvolvimento que não esgota os recursos naturais.

Com base nesse princípio, a metodologia adotada neste artigo foi estruturada em dois passos, conforme segue:

### 1. Identificação das causas e quantificação das principais perdas de minério inerentes à lavra de xisto com escavadeira de arrasto Dragline;

Causa da perda do topo da camada de xisto superior

- ✓ O movimento de arraste da caçamba pela *Dragline Marion* para a remoção da base da camada de capeamento (estéril) remove de forma conjunta o topo da camada de xisto superior (minério);

- Causa da perda da base da camada de xisto inferior

Desconsiderada como ROM devido aos menores teores de óleo de sua base em relação ao restante da camada, esta com média de 6%.

- Quantificações das perdas:

A perda de minério relativa ao topo da camada de xisto superior de 0,5 metros, equivalente a 7,94 % da massa total de minério de xisto superior. Para a camada de xisto inferior a perda média de minério de 0,8 metros, equivalente a 25 % da massa de minério de xisto inferior.

## 2. Cálculo de aumento de jazida de xisto pela característica da lavra seletiva dos mineradores contínuos de superfície

Conforme Presidência da República, (1968), em seu Art. 6º, considera-se jazida toda massa individualizada de substância mineral ou fóssil de valor econômico, aflorando à superfície ou existente no interior da terra.

Os cálculos das jazidas de xisto seguem o modelo de blocos tridimensionais (Yamamoto, 1991), considerou - se três cenários aplicando -

se a Equação 1 abaixo. Um para o método de lavra atual utilizando a lavra de xisto com Dragline Marion, e outros dois utilizando adições nas espessuras de lavra das camadas de xisto superior e inferior com mineradores contínuos de superfície. Contabilizados 679 blocos de xisto superior e 1152 blocos de xisto inferior em toda a mina.

Equação (1) mostra o cálculo de jazida de xisto

$$A \times B \times C \times D \times E = R (1)$$

Onde:

A = Comprimento do bloco (m);

B = Largura do bloco (m);

C = Altura do bloco (m) em função da espessura da camada;

D = Número de blocos (minério);

E = Densidade do minério (t/m<sup>3</sup>);

R = Jazida de xisto (t).

❖ Equação válida para cálculo de estéril (m<sup>3</sup>) conforme [Tabela 04](#).

Realizando os cálculos conforme a [Equação \(1\)](#), obtém-se:

Tabela 01 Jazida com *Dragline* - Cenário 01

	A	B	C	D	E	R(1)
<b>Xisto superior</b>	50	25	5,8	679	2,1	10.337.775
<b>Xisto inferior</b>	50	25	2,4	1152	2,1	7.257.600
<b>Total</b>						<b>17.595.375</b>

Tabela 02 Jazida com Mineradores - Cenário 02

	A	B	C	D	E	R(2)
<b>Xisto superior</b>	50	25	6,3	679	2,1	11.228.963
<b>Xisto inferior</b>	50	25	2,7	1152	2,1	8.164.800
<b>Total</b>						<b>19.393.763</b>

Tabela 03 Jazida com Mineradores - Cenário 03

	A	B	C	D	E	R(3)
<b>Xisto superior</b>	50	25	6,3	679	2,1	11.228.963
<b>Xisto inferior</b>	50	25	3,2	1152	2,1	9.676.800
<b>Total</b>						<b>20.905.763</b>

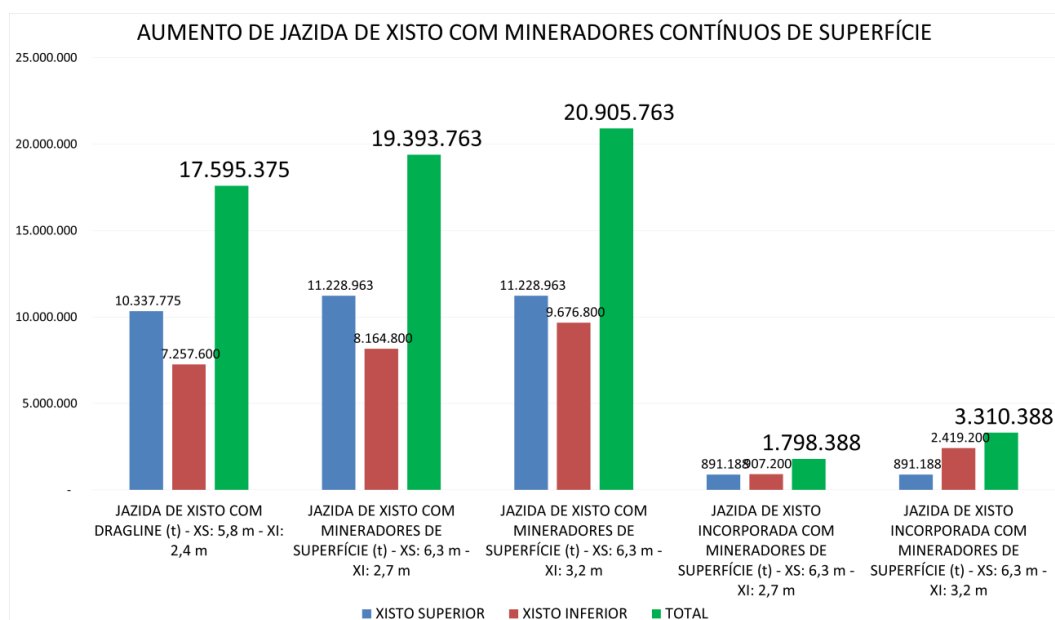


Figura 03 Jazida de xisto com *Dragline* e jazidas incorporadas com uso de mineradores contínuos de superfície.

A jazida incorporada de minério para o cenário 02 foi de 1,7 milhões de toneladas de xisto ou 10,22 % de aumento em relação à jazida de xisto do cenário 01 com *Dragline*. Este é considerado como realista, haja vista por vezes já serem praticadas tais espessuras quando a relação de massas de xisto superior e de xisto inferior lavradas permite. Para o cenário 03, considerado

como em potencial, incorporado cerca de 3,3 milhões de toneladas de xisto representando 18,81 % de aumento em relação a jazida de xisto com *Dragline*. Aproximadamente o dobro de incorporação de minério do cenário 02.

Tabela 04 volume de estéril (m<sup>3</sup>) da mina de xisto.

	A	B	C	D	E	R(4)
<b>Xisto superior</b>	50	25	16	679		13.580.000
<b>Xisto inferior</b>	50	25	8	1152		11.520.000
<b>Total</b>						25.100.000

### 3. RESULTADOS

Novos valores de variáveis estratégicas globais de mina pelo uso dos mineradores contínuos de superfície foram gerados promovendo possibilidade de reanálise do negócio mineração com vistas ao novo modelo de lavra.

Segundo Curi, 2017, a razão entre o volume de capeamento e a quantidade e reservas de minérios já retirada ou a ser retirada, expressa

em unidade volumétrica (ou de peso) é chamada de relação estéril/minério (REM).

Foram calculadas as REM como definido a partir dos valores encontrados para jazidas e volume de estéril da mina (Tabela 01, Tabela 02, Tabela 03, Tabela 04) resultando nos valores constantes na (Figura 04). Com a queda das REM pela aplicação dos mineradores contínuos de superfície, verifica-se a necessidade de menor esforço operacional para obtenção de uma tonelada de minério, assim como econômico, pois tem - se uma mina mais barata.

Curi, 2014 observa que na lavra de um corpo de minério, é comum abandonar massas mineralizadas por motivos diversos. Não se extraindo portanto, as totalidades das mineralizações, e isso costuma ser expresso por

[Equação 2](#)

$$R = \frac{\text{massa do minério extraído}}{\text{massa total do minério existente}}$$

um número adimensional denominado recuperação na lavra, que é definido pela expressão:

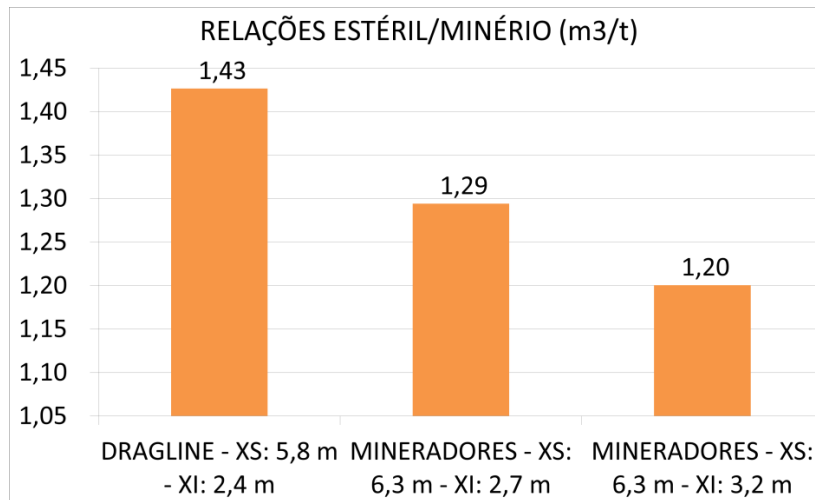


Figura 04 Relações estéril/minério e Recuperação da jazida na lava.

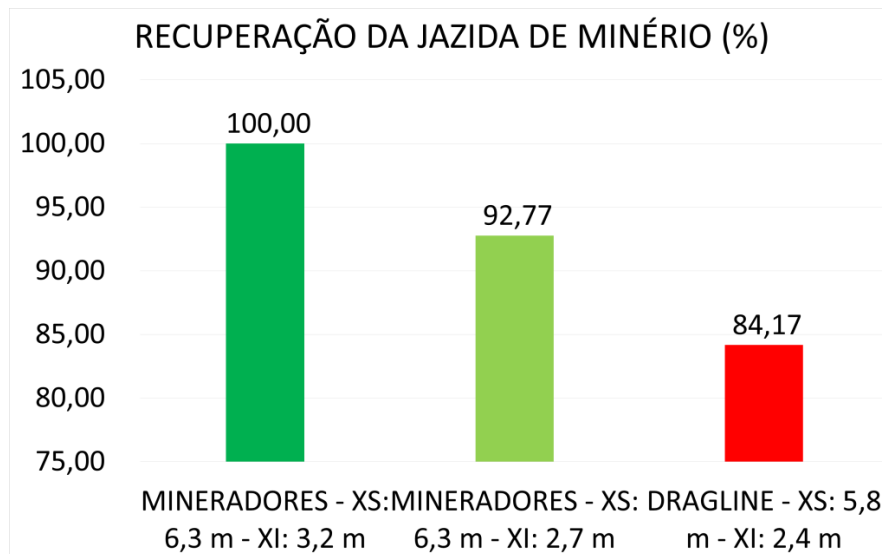


Figura 05 Recuperação da jazida na lava.

Aplicada a [Equação 02](#) obteve-se os valores de recuperação da jazida de minério ([Figura 05](#)). O uso dos mineradores contínuos de superfície apresenta o benefício potencial de maximizar o aproveitamento da jazida na sua totalidade em 100%. Adicionalmente, verifica-se que com o método de lavra atual da mina de xisto com *Dragline Marion* perde - se 15,83 % do total de minério com potencial de ROM.

#### 4. CONCLUSÃO

Considerando o significativo aumento de 18,81 % de jazida de xisto incorporada à mina da SIX, as menores relações estéril/minério o que diminui o esforço de lavra e torna a mina mais barata, o potencial de recuperação da jazida na sua totalidade, a comprovação da viabilidade técnica de aplicação dos mineradores contínuos de superfície à luz de mecânica de rochas, que a geologia da jazida de xisto possui todas as características favoráveis para aplicação dos mineradores contínuos de superfície, o presente estudo de viabilidade técnica do uso dos mineradores contínuos de superfície na mina de xisto de São Mateus do Sul conclui pela viabilidade de aplicação dos equipamentos mineradores contínuos de superfície na mina de xisto da SIX.

#### REFERÊNCIAS

HARTMAN, H. L. Introductory Mining Engineering. New York. John Wiley & Sons, 1987. 207p;

WIRTGEN GMBH. Wirtgen Surface Mining Manual, Applications and Planning Guide. 2010. 11 - 12 p.

WIRTGEN GMBH. Wirtgen Surface Mining Manual, Applications and Planning Guide. 2010. 20 p.

U.S Energy Information Administration – EIA - Nonrenewable and renewable energy sources. Disponível em: [https://www.eia.gov/energyexplained/?page=nonrenewable\\_home](https://www.eia.gov/energyexplained/?page=nonrenewable_home). Acesso em: 06 de janeiro de 2018.

World Wide Fund for Nature – WWF. Disponível em:

[https://www.wwf.org.br/natureza\\_brasileira/questoes\\_ambientais/desenvolvimento\\_sustentavel/](https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel/). Acesso em: 06 de janeiro de 2018.

CURI, A. Lavra de minas: São Paulo: Oficina dos Textos, 2017. 115 p.

American Society for Testing and Materials, 1990. ASTM D3904-90 - Test Method for Oil From Oil Shale (Resource Evaluation by the Fischer Assay Procedure). Developed by Subcommittee: D02.02.0D

Acesso em: 08 de janeiro de 2018: <https://www.astm.org/Standards/D3904.htm>

[DECRETO Nº 62.934, DE 2 DE JULHO DE 1968](#). Regulamento do Código de Mineração.

Acesso em: 08 de janeiro de 2018:

[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/1950-1969/D62934.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1950-1969/D62934.htm)

CURI, A. Minas a céu aberto: Planejamento de Lavra: São Paulo: Oficina dos Textos, 2014. 117 p.

Yamamoto J. K. 1991. Comparação de métodos computacionais para avaliação de reservas: um estudo de caso na Jazida de Cobre de Chapada, GO. Universidade de São Paulo. 90 p. (Tese de doutoramento)

CURI, A. Lavra de minas: São Paulo: Oficina dos Textos, 2017. 101 p.

CURI, A. Minas a céu aberto: Planejamento de Lavra: São Paulo: Oficina dos Textos, 2014. 83 p.

Artículo recibido en: 30.04.2025

Artículo aceptado: 27.05.2025