

## ANÁLISE DOS CUSTOS DE PERFURAÇÃO DE TETO REALIZADOS NAS ATIVIDADES DE EXTRAÇÃO DO CARVÃO MINERAL

Carlos Solano Lopes Bettiol<sup>1</sup>

Elvys Isaías Mercado Curi<sup>2</sup>

**Resumo:** Na mineração, os gastos de manutenção são proporcionalmente muito superiores aos demais setores industriais. A produtividade da mina, em parte, depende da velocidade da preparação das galerias para extração do mineral. Para ampliar as galerias há necessidade de perfurar para sua detonação e colocação de fixadores nos tetos. A instalação dos suportes de teto requer trabalho técnico, de máquinas e ferramentas. Avaliar os custos deste processo permitiria avaliar o desempenho da atual tecnologia de perfuração. Os custos de uma empresa mineradora foram analisados, processando o consumo de brocas e sua perfuração. O objetivo desta pesquisa é obter o valor de custo por metro de perfuração com a atual tecnologia. Nos estudos foi considerado o tempo de vida das brocas utilizadas nos processos de perfuração de teto, além de todos os fatores que influenciam nos custos totais deste processo. Após foram aplicados quatro modelos matemáticos para obter os custos por metro de perfuração. Os valores de custo por metros de perfuração, nas empresas mineradoras de carvão, foram obtidos e comparados. Os estudos destas variáveis são importantes para comparar melhorias nos processos de perfuração, a fim de avaliar custos por metro perfurado de cada tipo de broca. Os resultados de cada modelo matemático mostraram diferentes valores de custo por metro de perfuração, sem ser tão discordante, isto se dá pelo fato de cada modelo utilizar inúmeras variáveis para análise do custo total de metro perfurado. Estes custos são importantes para avaliar outras tecnologias alternativas de perfuração e a influência nos custos totais nas atividades mineiras.

**Palavras-chave:** Broca mineradora, Desgaste, Custos, Metro perfurado.

### 1 INTRODUÇÃO

A extração de carvão mineral se realiza utilizando alguns métodos de desmonte, realizado com explosivos ou com minerador contínuo. Após a perfuração se colocam os explosivos, e se detona uma parte da mina. A seguinte etapa consiste em instalar suportes de segurança no túnel da mina, para isso, perfura-se o teto utilizando brocas de metal duro de diferentes tamanhos, desse modo formam-se as

---

<sup>1</sup>Graduando Carlos Solano Lopes Bettiol. E-mail: solano204@hotmail.com

<sup>2</sup> Prof. Dr. Eng. Elvys Isaías Mercado Curi. E-mail: elvys.curi@satc.edu.br

galerias. Nos suportes, diferentes tipos de tirantes são utilizados, selecionando o mais apropriado para a geologia da mina. A missão dos tirantes é de unir as camadas de rochas que estão localizadas no teto, protegendo e assegurando máquinas e operadores de uma possível queda de rochas. Na perfuração, as brocas são submetidas ao desgaste severo por realizar operações com giro e percussão, muitas vezes com impacto em matérias rochosas, além de estar em um ambiente altamente abrasivo e corrosivo. Devido ao desgaste das brocas seu tempo de vida é relativamente curto, afetando a perda de massa no gume ou com a quebra do material inserto. Por isso, as brocas influenciam altamente nos custos de extração e na produtividade da empresa. A Fig. 1 mostra uma máquina que realiza o processo de perfuração de teto dentro da mina.

Figura 1 - Perfuratriz de teto.



Fonte: (Sandvik, 2020).

O registro de dados de manutenção da empresa Carbonífera Metropolitana S/A identifica que as brocas são um dos equipamentos mais críticos da máquina perfuratriz de teto usada para este tipo de perfuração. O desgaste severo ocorre pelos materiais rochosos de diferentes durezas durante a perfuração. A frequência de manutenção é alta, não mais de um turno de trabalho, ou seja, 8 horas, após deste curto período é levada para sua afiação aos operários especializados.

O objetivo do presente trabalho é analisar custos acarretados pela perfuração com brocas mineradoras, levando em consideração todo o processo de perfuração de teto, incluindo a instalação dos fixadores e dos suportes em empresas mineradoras de carvão. No estudo se avalia o tempo de vida das brocas utilizadas

nos processos de perfuração, além dos fatores que influenciam nos custos totais deste processo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Segundo Ramos (2011), as brocas servem para penetrar nas formações no subsolo, por meio destas se estabelece contato entre a zona produtora da matéria prima e da superfície. Na perfuração rotativa, o processo de perfuração de um furo na crosta terrestre requer o uso de um elemento de corte que é constituído pela broca. As condições de seleção e operação do pavio constituem um dos problemas mais relevantes que o engenheiro enfrenta e, para isso é muito importante conhecer o básico design para identificar as diferenças existentes entre os bits disponíveis no mercado bem como os avanços mais recentes na área de projeto de brocas.

Todo o processo de perfuração envolve uma variedade no consumo de acessórios, uma vez que eles sofrem impactos constantes, necessitando de trocas frequentes. Por sua vez a dureza da rocha tem grande influência no consumo de bits, barras, hastes, luvas, martelo, etc. Como o consumo destas peças depende da mesma, seu custo pode variar entre 15 a 40% das despesas totais com perfuração (Rajpot, 2009).

### **2.1 CONSUMO GLOBAL DE ENERGIA**

Holmberg (2017) estima que o consumo total de energia das atividades de mineração global, incluindo a extração de rochas, seja 6,2% do consumo total de energia global. Cerca de 40% da energia consumida na mineração (equivalente a 4.6 EJ anualmente em escala global) é usado para superar o atrito. Além disso, 2 EJ é usado para recondicionar, substituir peças desgastadas, reservar e estocar peças de reposição e equipamentos necessários devido a problemas relacionados ao desgaste. Os maiores setores em uma mineradora que consomem energia são moagem (32%), transporte (24%), ventilação (9%) e escavação (8%), o atrito e o desgaste têm valores significantes e resultam anualmente em 970 milhões de toneladas de CO<sup>2</sup> em todo o mundo na mineração mineral (representando 2,7% da produção mundial de CO<sup>2</sup> em emissões).

## 2.2 CONSUMO DE ENERGIA DEVIDO AO ATRITO E DESGASTE

Na indústria da mineração, Holmberg (2017) estima que são gastos aproximadamente 210 bilhões de Euros ao ano em problemas causados pelas perdas por atrito e desgaste em todo o mundo. Deste total, cerca de 27% são destinados para produção e substituição de peças e equipamentos devido a falhas provocadas pelo desgaste.

Souza (2019) relata que a indústria enfrenta sérios problemas relacionados ao desgaste de componentes e equipamentos, resultando em perdas econômicas em larga escala. Materiais resistentes desenvolvidos aos mais variados mecanismos de desgaste é uma busca incessante dos centros de pesquisa. Estudos procuram desenvolver uma maior gama de variedades, a fim de satisfazerem vários tipos de serviços, com a finalidade de redução ou até mesmo a eliminação destes problemas ocasionados.

Aproveitar as novas tecnologias atualmente disponíveis para reduzir o atrito e as perdas de desgaste provavelmente economizaria 31.100 milhões de euros, 280 TWh de energia e reduziria 145 milhões de toneladas de emissão de CO no curto prazo (10 anos) anualmente. Nos próximos 20 anos, estima-se que isso economizaria 62.200 milhões de euros e 550 TWh de energia, além de resultar em uma redução de 290 milhões de toneladas de emissão de CO por ano. Novas tecnologias poderão reduzir ainda mais as perdas por atrito e diminuir o desgaste do equipamento a fim de reduzir ainda mais as perdas econômicas e de eletricidade, diminuindo também o gás CO emitido como resultado da mineração (Cuffari, 2018).

## 2.3 CUSTOS DE PERFURAÇÃO

De acordo com Silva (2012) embora representem apenas uma fração do custo total do equipamento, as brocas são um dos elementos mais complexos para se poder calcular avaliando seu aspecto econômico de perfuração. Com intuito de avaliar seu desempenho, vários parâmetros de comparação são usados como: o custo da broca, velocidade de perfuração, comprimento de seção perfurado, etc. O objetivo é obter o menor custo de perfuração sem colocar em risco as operações

cumprindo as especificações de perfuração e observando as restrições que possam existir.

Os custos de perfuração são expressos por metro de rocha perfurada (\$/m) onde os dois principais fatores são: os custos diretos envolvidos no consumo de materiais e os custos indiretos envolvidos com gastos não atribuídos a produção. Devido à variabilidade encontrada na estimativa de custo, existem metodologias diferenciadas para a sua determinação, onde cada uma é baseada em um ponto principal (Guazzelli, 2013).

Para Hartman et al. (1992) os custos de perfuração envolvem diversos fatores, entre eles, os custos de posse (depreciação, seguro, impostos), custos operacionais (mão de obra, combustível, peças de reposição e de manutenção) e os custos com bit. O que se pode observar na Eq. 1 são as variáveis que estão incluídas na fórmula e relacionadas em função da vida útil do bit de perfuração.

$$Ct = \frac{(Co+Cop)*Bl(h)+Bc}{Bl(m)} \quad (1)$$

Para Paterson (1999), o custo de perfuração é a soma da relação entre o custo do bit e sua vida útil, o custo operacional do equipamento e a taxa de perfuração. Ele afirma que esta relação serve como ferramenta para identificar a influência destes no custo total. A Eq. 2 mostra o método sugerido.

$$Ct = \frac{Bc}{Bl} + \frac{Rr}{Pr} \quad (2)$$

Apesar de compreender que o custo está associado principalmente ao avanço da perfuração e no consumo dos bits, é de suma importância analisar alguns outros aspectos que envolvem os custos operacionais com maior detalhe. O custo total de perfuração se resume na Eq. 3 que representa a soma das parcelas envolvidas nos custos de posse e operação (depreciação, consumo de energia, custo com mão de obra, etc.) divididas pela produtividade da perfuratriz (Jimeno, 1995).

$$Ct = \frac{Cd+Ci+Cm+Co+Ce+Cl+Cb}{Pr} \quad (3)$$

O modelo econômico adotado nos gerenciamentos dos custos de perfuração de poços de petróleo (Barragam, 2007) está baseado na fórmula internacionalmente adotada de custo métrico (Jackson 2000), como podemos verificar na Eq. 4 a seguir.

$$Cm = \frac{Cb + Ch \cdot (Hm + Hr)}{Mp} \quad (4)$$

De acordo com Junior (2008) este é o método mais difundido em todo mundo para fins de avaliação dos resultados meramente operacionais de perfuração de um poço ou campo de petróleo. Eles contêm custos específicos que envolvem o avanço do poço pela perfuração e elimina problemas oriundos da falta de aplicação de boa técnica para o avanço do poço, como pescarias, tempos perdidos em reparo, etc.

A capacidade de perfuração da rocha é afetada por vários fatores relacionados aos parâmetros de trabalho da máquina de perfuração, o método de perfuração, tipos de brocas ou formas, e às características geotécnicas da massa de rocha. Os parâmetros geotécnicos influenciam o desempenho da perfuração e o desgaste das brocas e incluem a condição e a estrutura da massa rochosa, o comportamento mecânico e a composição mineral dos materiais rochosos. (YENICE, 2019).

Nas brocas projetadas para rochas moles, o efeito de raspagem é predominante; em rochas duras, cuja taxa de penetração é baixa e os custos de perfuração tendem a ser alto, o mecanismo de esmagamento provou ser o mais adequado. Silva et al apud Santana (2012).

Para a escavação de túneis Costa (2012) argumenta que é necessário considerar os parâmetros relevantes ao planejamento de operações a realizar para abertura de um túnel com recurso a explosivos, com base nas relações, diretrizes e equações empíricas desenvolvidas e disponibilizadas por diferentes autores ao longo dos anos, com o objetivo de obter resultados mais próximos à realidade, para ter uma maior eficiência, segurança e lucro.

Segundo KARPOV (2018), as normas de desempenho costumavam ser definidas sem a devida consideração pelos parâmetros qualitativos da perfuração. O fator humano continua sendo um fator constitutivo na avaliação das normas de produtividade para uma equipe de perfuração em uma determinada seção de

trabalho. Um operador de broca percebe quantitativamente que a pressão de trabalho, a força de avanço, a velocidade de rotação, é sua responsabilidade e o desempenho depende de sua motivação e suas habilidades.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental consiste no levantamento de dados referentes aos fatores que envolvem o processo de perfuração. A principal fonte de dados são as brocas que foram renovadas durante 7 meses de trabalho de perfuração de teto na empresa Carbonífera Metropolitana S/A.

Além de custos oriundos das máquinas e equipamentos de perfuração observam-se também outros fatores que influenciam no comportamento analítico de gastos durante a perfuração de teto como a energia utilizada para este procedimento, cálculos de desgastes, atrito, mão de obra, depreciação do equipamento, entre outros.

#### 3.1 CONSUMO DOS BITS DE PERFURAÇÃO

Durante o processo de produção, os tempos de vida médios das brocas variam conforme a demanda de material a ser extraído pela empresa mineradora assim como o local a ser perfurado afetando diretamente no seu desempenho. A broca em estudo que faz a perfuração do teto para instalação de tirantes é mostrada na Fig. 2.

Figura 2 - Broca de perfuração de teto.



Fonte: Autor (2020).

Os bits mais utilizados para perfuração de teto na mineradora em estudo são os de 25 mm e de 29 mm. Os dados de consumo mensais de brocas de perfuração de teto foram analisados a partir do 1º dia de cada mês, com intuito de verificar a quantidade comprada e utilizada pelos operadores da mineradora. A tab. 1 mostra os dados obtidos para compra do cone bit de 25 mm durante os 7 meses analisados.

Tabela 1 – Dados mensais cone bit 25 mm.

<b>Mês/ano</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor total</b>
Outubro/2019	44	2692,00
Novembro/2019	36	2232,00
Dezembro/2020	24	1488,00
Janeiro/2020	75	4650,00
Fevereiro/2020	14	868,00
Março/2020	47	3038,00
Abril/2020	49	3234,00
Média	41	2600,29

Fonte: do autor (2020).

Os dados obtidos para a utilização mensal do cone bit de 29 mm também durante os 7 meses analisados estão apresentados conforme Tab. 2.

Tabela 2 - Dados mensais cone bit 29 mm.

<b>Mês/ano</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor total</b>
Outubro/2019	7	222,48
Novembro/2019	4	104,64
Dezembro/2020	8	209,28
Janeiro/2020	8	210,82
Fevereiro/2020	3	83,11
Março/2020	8	228,38
Abril/2020	4	127,46
Média	6	169,45

Fonte: do autor (2020).

Por meio destes dados consegue-se identificar que o tipo de cone mais utilizado pela empresa carbonífera durante os meses apresentados nas tabelas é o cone bit de 25 mm, isto também se deve pela geologia do local perfurado. Também consegue visualizar que há uma variação grande de quantidade entre alguns meses, isto se deve pela necessidade de produção que interfere diretamente na perfuração

serem maior em alguns meses do que em outros, um fator verificado, além disso, são os valores dos bits que se alteram ao longo do tempo devido ao valor de mercado.

Após levantamento dos dados fornecidos para os tipos de brocas e quantidade utilizadas foi verificado também o comprimento total de perfuração em metros realizado durante um dia de trabalho, chegando a um valor de 1000 metros perfurados ao longo de uma jornada de 12 horas de trabalho.

### 3.2 CUSTOS COM LUBRIFICANTES

Para a estimativa de consumo de lubrificantes em perfuratrizes rotativas, Gokhale (2011) sugere a Eq. 5 demonstrada a seguir.

$$Q = 6 \times 10^{-3} * D \quad (5)$$

### 3.3 CUSTOS COM ENERGIA

A Eq. 6 sugerida por Jimeno et al. (1995) tem a função de calcular o consumo de energia através da potência do motor e o preço do combustível ou valor pago por demanda de energia. O custo com combustível ou energia ( $C_e$ ) depende do tipo e porte do equipamento.

$$C_e = P * C_c \quad (6)$$

Foi verificado através do manual da máquina perfuratriz de teto a sua real potência, após isto foi convertido para kW com intuito de dimensionar os cálculos através da fórmula. Foi coletada também a informação do valor em kW/hora pago pela carbonífera. Com essas informações consegue-se encontrar o custo total de energia consumido pela máquina, estão demonstrados os dados que serão incluídos nos cálculos na Tab. 3 a seguir.

Tabela 3 – Dados de consumo de energia.

Dados de consumo	Valor	Unidade
Potência	75	cv
Potência	55,16	kW
Valor	0,19	(kW/hora)

Fonte: do autor (2020).

### 3.4 CUSTOS COM MÃO DE OBRA

Os custos anuais já com salário e encargos gastos com os operadores da perfuratriz de teto dividido pelo número de horas produzidas no período representam o custo da mão de obra direta.

Foi realizado o levantamento de custos com mão de obra para realizar a perfuração, o custo está diretamente ligado ao operador responsável pela operação do equipamento, a Tab. 4 a seguir mostra os valores obtidos junto com a carbonífera que realizou o fornecimento dos dados. As atividades efetivas dedicadas a perfuração são 12 horas por dia e 5 vezes por semana. São destinadas 4 horas diárias para atividades onde estariam compreendidas as atividades de manutenção.

Tabela 4 – Custos com mão de obra.

Dados de mão de obra	Valor
Número de operadores diário	4
Horas semanais trabalhadas	120
Salário com encargos	24000

Fonte: do autor (2020).

### 3.5 CUSTOS COM DEPRECIAÇÃO

O cálculo de depreciação tem função de avaliar o equipamento utilizado, avaliando-se a deterioração causada pelo uso e envelhecimento, os quais são fatores muito importantes no custo total. Os custos relacionados a depreciação foram definidos como depreciação linear, pois equipamentos de mineração utilizam estes métodos. O bem perde a cada ano, a diferença do valor dele como novo subtraído do valor residual, dividido linearmente pela sua vida útil econômica. Conforme a Tab. 5 a seguir foi definido o tempo de vida útil da perfuratriz.

Observa-se que os equipamentos utilizados em mineradoras têm sua vida útil estimada em 15 anos.

Tabela 5 – Vidas úteis para condições normais de uso e manutenção.

<b>Setores Diversos</b>	<b>Anos</b>
Carpintaria	25
Equipamentos de mineração	15
Fabricação de cerâmica	20
Fabricação de fumos/cigarros	15
Fabricação de óleo vegetal	25
Fabricação de papel e celulose	25
Equipamentos para envase de bebidas	15
Empacotadoras	15
Fabricação de produtos de borracha e similares	20
Produtos farmacêuticos	20

Fonte: Material didático de Eng. Econômica/ Análise Econômica, 2019.

### 3.5.1 Alteração da vida útil econômica por tratamento de fatores

Um fator a determinar-se para obter o custo de depreciação é o fator de vida útil econômica ajustada. O valor se refere à mudança no valor da vida útil foi determinado anteriormente, devido aos fatores que devem ser analisados, visando a verificação de suas condições de uso, o tipo de ambiente de trabalho. Também se deve considerar a regularidade de uso e o tipo de manutenções, reduzindo ou aumentando a sua vida útil econômica. Manutenções constantes, em ambientes não agressivos certamente terão valores de mercado diferenciados que outro equipamento trabalhando com adversidades, de mesma idade, porém com má conservação, com realização de manutenção precária e exposto a ambientes agressivos que deterioram o equipamento com maior velocidade.

Para determinar os valores de vida útil econômica ajustada, reduzindo ou aumentando sua vida útil, devem-se definir três fatores de correção que resultam no fator operacional. A Tab. 6 a seguir representa o fator de manutenção.

Tab.6 – Fator de manutenção.

<b>Tipo de manutenção</b>	<b>Conceito</b>	<b>Fator de manutenção</b>
Corretiva ou normal	Base quebrou-consertou	1,00
Preventiva	Base ações programadas	1,10
Preditiva	Base ações monitoradas	1,20

Fonte: Material didático de Eng. Econômica/ Análise Econômica, 2018.

Com os dados de 4 horas de parada diária, para atividades de inspeção e manutenção, pelas ações programadas, foi definido como manutenção preventiva. Após definido o fator de manutenção verifica-se o fator de agressividade, a que se relaciona diretamente com o ambiente de trabalho. Baseado em ambientes que alteram seu desempenho e vida útil como: níveis de temperatura, níveis químicos e de poeira excessiva, a Tab. 7 a seguir demonstram os tipos destes fatores.

Tab.7 – Fator de agressividade.

<b>Tipo de ambiente</b>	<b>Fator de agressividade</b>
Atmosfera neutra	1,00
Atmosfera medianamente agressiva	0,9
Atmosfera agressiva	0,8

Fonte: Material didático de Eng. Econômica/ Análise Econômica, 2018.

A máquina perfuratriz de teto é usada no subsolo da mineradora. Por isto, define-se o fator de agressividade como uma atmosfera agressiva, para o equipamento em questão. O último fator definido para a alteração de vida útil econômica, a o que se refere ao tratamento de fatores, é o coeficiente de serviço que condiz com a função definida pela vistoria, isto é baseado no regime de trabalho, a qual está expressa conforme Tab. 8 a seguir.

Tab. 8 – Fator de serviço.

<b>Tipo de serviço</b>	<b>Fator de serviço</b>
Normal	1,00
Regime mediano	0,9
Trabalho intenso	0,8

Fonte: Material didático de Eng. Econômica/ Análise Econômica, 2018.

Os três turnos de trabalho efetivo da máquina são 12 h por dia, com este dado se define o fator de serviço da máquina em regime mediano. Após definido estes três fatores de correção encontra-se o fator operacional ( $F_{op}$ ) que está disposto na Eq. 7.

$$F_{op} = F_m * F_a * F_s \quad (7)$$

### 3.6 CUSTOS COM MANUTENÇÃO

Lubrificantes, filtros e mão de obra estão relacionados com o custo de manutenção. Os custos de manutenção ( $C_m$ ) incluem os gastos com relação à manutenção preventiva, assim como paradas emergências, para conserto do equipamento. Também se considera um fator de reparação ( $F_r$ ) recomendado por Jimeno et al. (1995).

A Eq. 8 a seguir representa o cálculo de custo por manutenção.

$$C_m = \left( \frac{P_c}{1000} \right) * F_r \quad (8)$$

Caso o fator de reparação ( $F_r$ ) fornecido pela equação não inclua os encargos relacionados com a mão de obra, pode-se utilizar a Eq. 9 a seguir, adicionando-se aos custos de manutenção os custos de mão de obra, como sugerido por Rajpot (2009).

$$C_m = P_r + (M_o * P_t) \quad (9)$$

### 3.7 CUSTOS COM SEGURO DO EQUIPAMENTO

Os dados fornecidos pela empresa carbonífera, descrevem que todas as máquinas e equipamentos, utilizados no subsolo, sobretudo os que envolve os serviços para extração do carvão mineral, não possuem seguro, por isto esta parte da equação será desconsiderada para os cálculos.

### 3.8 TAXA DE PRODUTIVIDADE

A taxa de produtividade relacionado a manutenção expressa a quantidade de material produzido pelo custo total gasto durante esta produção. Somando a metragem de furos realizados com o cone bit de 25 mm e de 29 mm durante o mês e utilizando da mesma forma a soma dos custos com bits durante o mês consegue-se encontrar a taxa de produtividade.

### 3.9 PRODUTIVIDADE DA PERFURATRIZ

A perfuratriz de teto tem seu trabalho diário estimado em 12 horas efetivas de perfuração os quais estão compreendidas 20 horas no trabalho total na galeria. Estão previstas 4 horas para atividades de manutenção, neste tempo não se realizam atividades de perfuração. Por tanto há 8 horas diárias de tempo de deslocamento da máquina até seu ponto para realização do trabalho além de outras atividades para efetuar o serviço de perfuração. A Tab. 9 mostra com mais detalhes a quantidade de metros perfurados ao longo do mês de trabalho com destaque para a quantidade de metros perfurada por hora, que se utiliza para o cálculo de metro perfurado.

Tab. 9 – Produção em metros da perfuratriz para bit de 25 mm e 29 mm.

Tipo	Horas diárias	Dias mensais	Metros por hora	Metros por dia	Metros por mês
Bit 25 mm	12	22	72,70	872,34	19191,49
Bit 29 mm	12	22	10,64	127,66	2808,51

Fonte: Do autor (2020).

Para Araujo (1997) a medição da taxa de produtividade (PR) é feita pela definição, como sendo a razão entre o *output* real produzido (produção) e o *input* real consumido (gasto). O modelo de calculo se mostra na Eq. 10:

$$PR = \frac{\text{Produção}}{\text{consumo}} \quad (10)$$

A taxa de produtividade a ser calculada seria para uma hora de perfuração, o que compreenderia o valor de 22000 m por mês entre o gasto mensal das brocas. Não se considera outros custos por estar compreendido em outros parâmetros dos modelos de cálculo exposto.

Depois de ter realizado o levantamento de custos fixos e custos variáveis se foram realizando os cálculos utilizando as equações (5) até (10). Os valores foram incorporados em uma planilha de cálculo do *software* Excel®, de modo que se teria um algoritmo que administraria os dados de entrada, as equações descritas neste trabalho e forneça os dados de saída parcial e total. O uso dos modelos nas eq. (1) a (4), se mostram em tabelas com os resultados.

Inicialmente os dados foram depositados em Excel conforme Fig. 3 e através de cálculos foram obtidos os resultados.

Figura 3 – Dados em arquivo Excel.

Dados operacional		Dados consumo de energia		Custo com manutenção		Gastos salário mecânico
Horas semanais	36	Potência(cv)	75	Gasto mensal em peças	R\$ 29.166,67	R\$ 6.500,00
Horas mensal cada operador	180	Potência (kW)	55,16	Gato com Bit 25 mm mensal	R\$ 25.443,26	R\$ 5.670,21
Numero operadores	4	Potência mês (kW)	14562,24	Gasto com Bit 29 mm mensal	R\$ 3.723,40	R\$ 829,79
Horas mensal de todos	720	Custo kW/hora	R\$ 0,19	Gastos Mensais		
Salario operador	R\$ 6.000,00	Gasto mensal energia	R\$ 2.766,83	Tipo de bit	25 mm	29 mm
Gasto mensal	R\$ 24.000,00	Gasto bit 25 mm mensal	R\$ 2.413,61	Pr, peças de reposição	R\$ 25.443,26	R\$ 3.723,40
Salário por hora	R\$ 33,33	Gasto bit 29 mm mensal	R\$ 353,21	Mo, mão de obra	R\$ 5.670,21	R\$ 829,79
Salário por bit mensal	R\$ 510,64	Gasto por bit 25 mm (h)	R\$ 10,48	Pt, % de tempo parado	14,54	2,13
Gasto mensal bit 25 mm	R\$ 20.936,17	Gasto por bit 29 mm (h)	R\$ 10,48	Custo com manutenção mensal	R\$ 107.882,53	R\$ 5.488,91
Gasto mensal bit 29 mm	R\$ 3.063,83			Custo com manutenção (h)	R\$ 468,45	R\$ 162,87
Salário por bit 25 mm (h)	R\$ 29,08					
Salário por bit 29 mm (h)	R\$ 4,26					

Fonte: Do autor (2020).

A comparação dos resultados será analisada para custo por metro, após ter os valores relativos de custo por hora ou de custos totais.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados os respectivos resultados, obtidos através das análises

realizadas e cálculos a fim de obter e analisar os objetivos propostos no trabalho.

#### 4.1 RESULTADOS DE CUSTO POR METRO PERFURADO

Após analisar os dados e as tabelas referentes ao consumo de bits utilizado, assim como os valores mensais e quantidade de perfuração diária pode-se calcular o custo por metro perfurado, porém antes disto para inserção de dados na fórmula foi necessário calcular alguns parâmetros que irão ser incluídos nas equações. A Tab. 10 a seguir mostra alguns dados para o cone bits de 25 mm.

Tabela 10 - Dados mensais de utilização do cone bit de 25 mm.

<b>Média mensal de brocas</b>	<b>Valor total</b>	<b>Valor unitário</b>	<b>Metros perfurados/hora</b>	<b>Metros perfurados/dia</b>	<b>Metros perfurados/mês</b>	<b>Metros perfurados por broca</b>	<b>Horas de uso das brocas</b>
41	2600,29	62,98	72,70	872,34	19191,49	464,85	264

Fonte: do autor (2020).

Foi realizado o mesmo procedimento para outro tipo de bit utilizado na indústria carbonífera que é o cone bit de 29 mm que é verificado a seguir na Tab. 11.

Tabela 11 - Dados mensais de utilização do cone bit de 29 mm.

<b>Média mensal de brocas</b>	<b>Valor total</b>	<b>Valor unitário</b>	<b>Metros perfurados/hora</b>	<b>Metros perfurados/dia</b>	<b>Metros perfurados/mês</b>	<b>Metros perfurados por broca</b>	<b>Horas de uso das brocas</b>
6	169,45	28,24	10,64	127,66	2808,51	468,09	264

Fonte: do autor (2020).

Dados importantes para inclusão na fórmula foram obtidos através desta tabela, como: a quantidade de metros perfurados pela broca até o fim de sua vida útil e a quantidade de horas utilizada. Inicialmente estes dados foram incluídos para obter o custo por metro perfurado através do modelo de Hartman da Eq. (1), os valores são mostrados na Tab. 12 a seguir.

Tabela 12- Resultados para Eq. 1 de brocas de cone bit 25 mm e 29 mm.

<b>Diâmetro da broca</b>	<b>25 mm</b>	<b>29 mm</b>	<b>Unidade</b>
Custo de posse (Co)	15,63	15,63	R\$/h
Custo operacional (Cop)	33,33	33,33	R\$/h
Vida útil do bit (Bl)	264,00	264,00	h
Custo do bit (Bc)	62,98	28,24	R\$
Vida útil do bit (Bl)	464,85	468,09	m
Custo por metro perfurado (Ct)	27,94	27,67	R\$/m

Fonte: Do autor (2020).

Nota-se que os custos de posse e operação da perfuratriz não se alteram, pois a mesma máquina é utilizada para os dois casos de perfuração, assim como também é realizado pelo mesmo operador. Foi observado que alguns fatores influenciaram para o valor de metro perfurado do cone bit de 25 mm ser maior que o de 29 mm, o custo unitário é maior, sua vida útil em horas é a mesma, e sua vida útil em metros tem valores próximos.

Na Tab.13 a seguir está explícito os resultados obtidos pelo modelo de Paterson da Eq. (2). Neste modelo foi observado que também não é levado em conta um detalhamento mais específico para análise do custo por metro perfurado.

Tabela 13 - Resultados para Eq. 2 para brocas de cone bit 25 mm e 29 mm.

<b>Diâmetro da broca</b>	<b>25 mm</b>	<b>29 mm</b>	<b>Unidade</b>
Custo do bit (Bc)	62,98	28,24	R\$
Vida útil do bit (Bl)	464,85	468,09	m
Custo operacional (Rr)	33,33	33,33	R\$/h
Taxa de perfuração (Pr)	1,76	1,76	m/h
Custo por metro perfurado (Ct)	19,04	18,96	R\$/m

Fonte: Do autor (2020).

Verificou-se que na Tab. 13 não foi utilizado custo de posse do equipamento, além da vida útil do bit em horas, porém utilizou-se a taxa de perfuração que a máquina realiza em metros por hora, nota-se também que a vida útil do bit de 29 mm é maior em relação ao de 25 mm, custos operacionais foram iguais para os dois casos assim como a taxa de perfuração foi associada a mesma para ambas as brocas.

Os valores de custo por metro do modelo de Paterson da eq. (2) foram menores que o modelo de Hartman da Eq. (1). Isto se deve porque no modelo de Hartman considera alguns custos que outro modelo não os considera.

Além destes dados para obtenção dos resultados da Eq. (1) e Eq. (2) obtiveram-se outros dados para encontrar o custo por metro perfurado conforme disposto no modelo de Jimeno da Eq. (3), onde o cálculo de custo por metro perfurado é influenciado por outros fatores. Os dados obtidos estão dispostos a seguir conforme Tab. 14.

Tabela 14 – Custos de posse e operação do modelo de Jimeno da Eq. 3 para brocas de bit de 25 e 29 mm.

<b>Diâmetro da broca</b>	<b>25 mm</b>	<b>29 mm</b>	<b>Unidade</b>
Custo de depreciação (CD)	13,63	1,99	R\$/h
Custo com imposto/seguro (CI)	0	0	R\$/h
Custo com manutenção e reparos (CM)	157,83	157,83	R\$/h
Custo com mão de obra (CO)	29,08	4,26	R\$/h
Custo com energia (CE)	10,48	10,48	R\$/h
Custo com lubrificantes (CL)	0	0	R\$/h
Custo com bits (CB)	9,85	0,64	R\$/h
Taxa de produtividade (PR)	8	8	m/h
<b>Custo por metro perfurado (CT)</b>	<b>27,61</b>	<b>21,90</b>	<b>R\$/m</b>

Fonte: do autor (2020).

Verifica-se que o gasto com imposto/seguro está com valor nulo, pois os valores com imposto já estão inclusos no preço final de compra da perfuratriz no valor de 1.800.000 reais. Custos com lubrificantes também não foram expressos devido as informações fornecidas pela mineradora, onde os custos de manutenção e lubrificação estavam dispostos em apenas um valor final de 25.000 reais mensais. Os custos de depreciação e os custos com mão de obra foram apresentados proporcionalmente ao número de bit utilizado durante o mês, o consumo de energia e a produtividade da perfuratriz são iguais, assim como os custos com manutenção.

Conforme as equações e metodologias apresentadas, o custo operacional do equipamento é constante, então a maior responsável pela alteração no custo de perfuração está ligada diretamente a taxa de perfuração, quanto maior a resistência para realizar o procedimento maior será o custo por metro perfurado, este fator está

ligado a geologia do local a ser perfurado. (PATERSON, 1999).

Depois de realizado a coleta de informações e inserir na Eq. 4 que tem seu objetivo o alcance de resultados para poços de petróleo, foram obtidos e estão mostrados na Tab.15 a seguir.

Tabela 15 – Resultados de custos conforme Jackson Eq. 4.

<b>Diâmetro da broca</b>	<b>25 mm</b>	<b>29 mm</b>	<b>Unidade</b>
Custo da broca (Cb)	9,85	0,64	R\$/h
Custo horário de operação (Ch)	33,33	33,33	R\$/h
Horas de manobra (Hm)	0	0	h
Tempo de rotação, operação (Hr)	1	1	h
Metros perfurados (Mp)	1,76	1,76	m
Custo por metro perfurado (Cm)	28,74	19,54	R\$/m

Fonte: Do autor (2020).

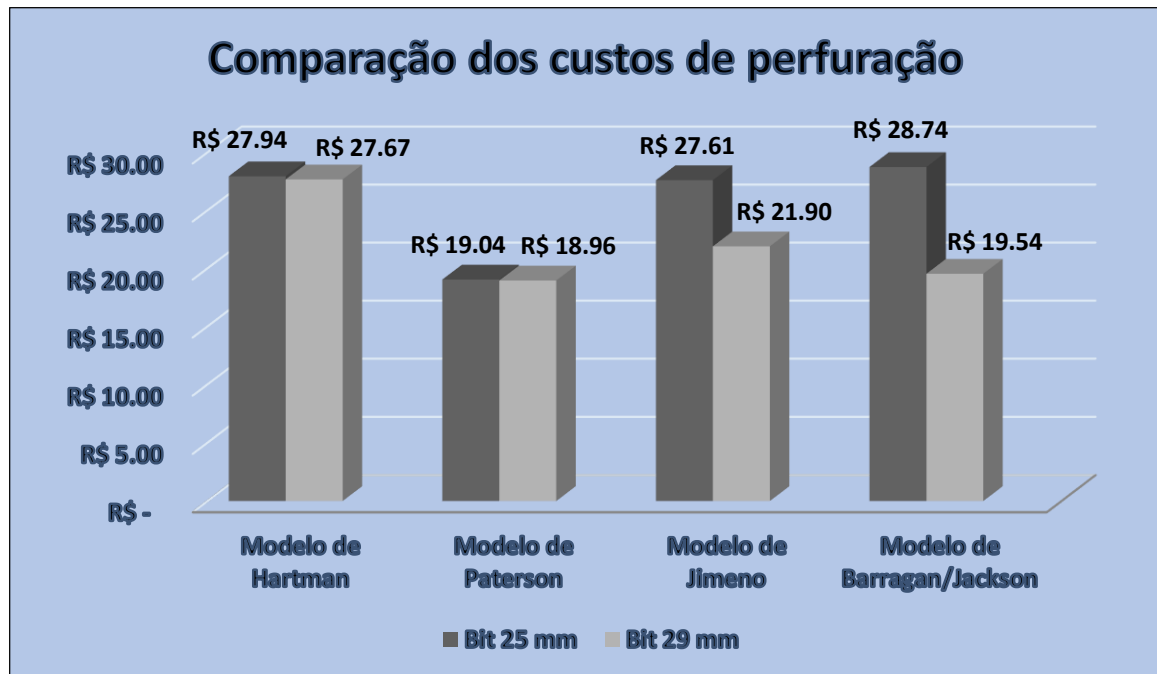
O tempo útil pode ser ramificado em 2 tipos, tempo útil produtivo (quando há avanço na perfuração) ou tempo útil improdutivo (quando não ocorre avanço na perfuração). Os tempos perdidos em sonda, em poço e em outras operações, são algumas destas classificações (Gabbay, 2015). Estes valores de tempo improdutivo na Eq. (4) seria o tempo de manobra, que é o tempo em que a máquina se desloca do ponto inicial de trabalho até o ponto de perfurações, assim como para realizar movimentos durante o trabalho. Todos os fatores apresentados na Tab.15 são relacionados ao tempo de 1 hora de trabalho.

Analisando os resultados da Eq. (4) nota-se que apesar de usarem poucos fatores que influenciam na perfuração em relação a equação 3, obteve valores próximos. Os resultados da Eq. 4 que é visada para o custo por metro perfurado em poços de petróleo demonstram que este tipo de metodologia também tem significado para o cálculo em mineradores de carvão.

A comparação dos diferentes resultados de custos de perfuração foi realizada e está disposta na Fig. 4. Nesta figura se observa valores próximos de custo por metro de perfuração para o cone bit de 25 mm nos modelos de Hartman, Jimeno e Barragan/Jackson, valores para o cone bit de 29 mm próximos nos modelos de Paterson, Jimeno e Barragan/Jackson, porém apenas o modelo de Jimeno considera custos de energia, salário dos operadores, manutenção, depreciação da

máquina, que são os custos indiretos.

Figura 4 – Comparação dos custos de perfuração.



Fonte: Do autor (2020).

Os resultados usando os quatro modelos fornecem informações interessantes no custo de perfuração por metro. Nota-se que o valor encontrado através da equação modelo de Jimeno é próximo das outras equações. Os gastos com energia, depreciação e manutenção foram incluídos e influenciam diretamente no valor final encontrado, porém as Eq. 1, 2 e 4 que não utilizam de muitas variáveis relacionados ao custo indireto, chegam a valores próximos com a utilização de outros métodos propostos.

Nos resultados de Jardim (2017) observa que a utilização da broca tricônica apresentou satisfatória economia em relação ao método utilizado anteriormente pela empresa de mineração de ferro, que visava à investigação de métodos ideais para perfuração das litologias friáveis da mina, a fim de definir a ferramenta de perfuração mais propícia para uso nos diversos tipos de rocha da mineradora de ferro. A Tab. 16 a seguir demonstra os valores encontrados de custo por metro perfurado.

Tabela 16 – Custo por metro perfurado

Mês	Custo por metro broca
Fevereiro	25,61
Março	35,36
Abril	18,75
Maior	27,80

Fonte: Adaptado de Jardim (2017, p.36)

## 5 CONCLUSÃO

O estudo em questão envolveu muitas áreas da engenharia mecânica, possibilitando uma análise mais profunda no controle de todos os fatores que envolvem o custo de perfuração de teto em uma mineradora de carvão, possibilitando a observação e levantamento de dados para estudos futuros.

Foi possível analisar através de dados e históricos da mineradora, que há uma enorme variação no consumo de bits utilizados para a perfuração, isto acontece devido a geologia de onde a máquina está realizando a operação, rochas com maior dureza precisam de um maior tempo para sua perfuração influenciando diretamente no consumo de gasto envolvido no processo, a taxa de perfuração está ligada diretamente ao valor final, pois é o tempo em que a operação é realizada, quanto menor for a taxa de perfuração maior vai ser o valor encontrado.

Depois de realizado os quatro cálculos propostos através de algumas literaturas verifica-se que todas obtiveram resultados diferentes. Os modelos de Hartman (Eq. 1), Paterson (Eq. 2) e Barragan/Jackson (Eq. 4) que não tiveram um detalhamento específico de tudo que envolve a perfuração tiveram seus valores próximos, em contrapartida o modelo de Jimeno (Eq. 3) que analisa vários dados como, energia consumida, potência do equipamento, valor de depreciação, também apresentou valores muito próximos em relação as equações anteriores, pois todos estes parâmetros influenciam diretamente no preço encontrado, sendo a equação mais coerente para obtenção do custo por metro perfurado.

Podemos analisar e identificar através do trabalho apresentado o quanto é importante conseguir modelos matemáticos na área de análise de custos, desgastes, entre outros objetivos. Os dados e históricos da empresa tiveram uma representatividade e uma facilidade de observação após a realização de modelos

matemáticos e dos resultados obtidos, assim conseguimos ter uma visão aguçada do que está acontecendo na indústria, para futuramente tomar medidas de contenção ou diminuição de gastos.

## REFERÊNCIAS

ARAUJO, Ana Luiza Mendonça de. Indicadores de qualidade e produtividade como instrumento de apoio à decisão no processo de expedição de veículos. Prod.[online]. 1997, vol. 7, n. 2.

Barragan, R.V. Otimização dos parâmetros de perfuração. [SI]: Petrobrás/SEREC/CEN-NOR, 2007. 147p.

Catalogo: DS311 Roch support bolter, SANDVIK, 2020. 4p.

COSTA, Bruno Manuel Amaral. Ferramenta informática de apoio à escavação de túneis. Dissertação de mestrado, Universidade de Porto, 2012.

CUFFARI, B. (2018). O Custo energético do Atrito e Do Desgaste na Mineração. Disponível em <[www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=1380](http://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=1380)> acesso em 20 de maio de 2020.

GABBAY, Max Simon. Uma Metodologia para Estimativa de Custos de Perfuração de Poços de Petróleo: Um Estudo de Caso de Dois Campos On shore na Região Nordeste do Brasil. Dissertação de Doutorado. 2015. 195f – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2015.

GUAZZELLI R. S. Análise de custos de perfuração e desmonte em mina de ferro. Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

Gokhale, B. V. Rotary drilling and blasting in large surface mines. Leiden: CRC Press/Balkema. 2011. 744 p.

Holmberg K, Kivikytö-Reponen P, Härkisaari P, Valtonen K, Erdemir A. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. Tribology International. 2017;11:116-139.

Hartman, H. L. et al. SME Mining Engineering Handbook. 2. ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.1992. 2 v.

Jackson, W.E. Making role. [Richardson]: IADC/The University of Texas, 2000. 137p.

Jardim, Ferreira. Thomas. Análise de desempenho de brocas triconicas 9 7/8". 2017. 41p. Monografia de graduação – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto/MG, Brasil 2017.

Jimeno, C. L.; Jimeno, E. L.; Francisco, J. A. C. Manual de perforacion y voladura de rocas. [S.l.]: Instituto Tecnológico Geominero de Españã. 1995. 541 p. (Tecnologia y Seguridad Minera).

Junior, A.S.D. Dissertação a escola politécnica da universidade de São Paulo para obtenção de titulo de mestre em engenharia. São Paulo, 2008. 135p.

KARPOV, V. N.; TIMONIN, V. V. Importance of early adjust mentofrotary-percussion drilling tool to mineral mining conditions. E&ES, v. 134, n. 1, p. 012024, 2018.

Netto, M.P. Classificação genérica de bens e períodos de depreciação vida útil econômica. Material didático complementar para uso exclusivo da disciplina de Eng. Econômica/ Análise Econômica. 2018. Faculdade Satc – criciúma – SC.

Netto, M.P. Capítulo VII depreciações. Material didático complementar para uso exclusivo da disciplina de Eng. Econômica/ Análise Econômica. 2018. Faculdade Satc – criciúma – SC.

Paterson, L. B. Drilling Efficiency and the Associated Benefits to the Mining Process. In: International Society of Explosives Engineers Annual Conference, 26. 2000. Anais Eletrônicos ISEE General Proceedings & 2000 Research Proceedings. Anaheim. 2001.CD-ROM.

Rajpot, M. A. The effect of fragmentation specification on blasting cost. 2009. 215 p. Dissertação de mestrado - Departamento de Engenharia de Minas, Queen's University, Kingston, 2009.

SANTANA, H. Trabalho Prático – Brocas de Perfuração E&P, Universidade Santa Cecília. 2010.

SILVA, S.F. Bolsista de Valor: Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense v. 2, n. 1, p. 135-140, 2012.

YENICE, Hayati. Determination of Drilling Rate Index Based on Rock Strength Using Regression Analysis. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 91, n. 3, 2019.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus professores Elvys Isaías Mercado Curi, Pascoal Meller Netto e Richard de Medeiros Castro pela disponibilidade e dedicação para auxílio nas dúvidas, aos meus pais, a minha esposa, a todos meus colegas e a empresa Carbonífera Metropolitana S/A pela informação de dados para o trabalho.

## LISTA DE SÍMBOLOS

Ct	[R\$/m]	Custo total de perfuração
Co	[R\$/h]	Custo de posse
Cop	[R\$/h]	Custo operacional
Bc	[R\$]	Custo do bit
Bl	[m]	Vida útil do bit
Rr	[R\$/h]	Custo operacional do equipamento
Pr	[m/h]	Taxa de perfuração
Bl	[h]	Vida útil do bit
Ct	[\$/m]	Custo total de perfuração
Cd	[\$/h]	Custo de depreciação
Ci	[\$/h]	Custo com imposto/seguro
Cm	[\$/h]	Custo de manutenção e reparos
Co	[\$/h]	Custo de mão de obra
Ce	[\$/h]	Custo de energia
Cl	[\$/h]	Custo com lubrificantes
Cb	[\$/h]	Custo com bits, hastes, luvas
Pr	[m/h]	Taxa de produtividade
Q	[l/h]	Quantidade de lubrificante
D	[mm]	Diâmetro do bit
P	[kWh]	Potência do motor
Cc	[\$kWh]	Custo de energia
Fm	[---]	Fator de manutenção
Fa	[---]	Fator de agressividade
Fs	[---]	Fator de serviço
Pc	[\$]	Preço de compra
Fr	[---]	Fator de reparação, disponível no manual do fabricante
Pr	[---]	Peças de reposição
Mo	[---]	Mão de obra
Pt	[%]	Tempo parado
Mp	[m]	Metros perfurados
Hr	[h]	Tempo de rotação, operação
Hm	[h]	Horas de manobra

Ch [\$ /h] Custo horário de operação  
Cb [\$ /h] Custo da broca  
Cm [\$ /m] Custo por metro perfurado