

AValiação DO DESEMPENHO DE BROCAS USADAS NAS MINAS DE CARVÃO USANDO SINAIS DE FORÇA VELOCIDADE E CORRENTE

Everton Sidnei Renner¹

Elvys Isaías Mercado Curi²

Resumo: Durante o processo de extração de carvão, se realizam dois tipos de perfurações, as que servem para colocar barra de fixação no teto e os furos para colocar explosivos. Essas perfurações são executadas usando brocas, cujos bits são ligas de carbeto de tungstênio. A geologia das minas tem diferentes composições, devido as camadas de rocha, material mineral e terra é heterogênea, por isso, nas perfurações se aplica diferentes tipos de esforços, em função das exigências dos materiais. Esta pesquisa tem como objetivo estudar os parâmetros de velocidade de rotação e tangencial, força de corte e de avanço, consumo de energia e desgaste de brocas usadas nas minas de carvão. Para avaliar alguns parâmetros de perfuração, foi desenvolvido uma bancada de ensaios, utilizando uma furadeira de 3,8 HP, instalando sensores de força, velocidade e de corrente. Como corpo de prova, foi utilizado tijolo maciço de argila, cuja resistência a compressão varia de 8,3 MPa a 18,7 MPa. Os ensaios consistiram na perfuração dos corpos de prova com diferentes velocidades e cargas, extraindo-se informação para calcular o rendimento de cada processo de operação, assim como o consumo de energia e o desgaste das ferramentas. A bancada forneceu informação para calcular a potência consumida e a útil, para isso se adaptou os modelos matemáticos propostos para o cálculo de velocidade e força. Os resultados determinam os melhores parâmetros de velocidade e força de avanço, assim como monitorar o desgaste. As brocas do tipo pastilha de Φ 26 e 29 mm seus rendimentos foram baixos, entre 20 a 25%, e o consumo mínimo de corrente elétrica foi de 0,82 A, incrementando-se em muitos casos com redução do rendimento para algumas carga e velocidades de rotação. A broca do tipo borboleta de Φ 42 mm teve até 80% de rendimento enquanto a de Φ 45 mm seu melhor desempenho foi em 33%, mas seu menor consumo de corrente foi 0,78 A.

Palavras-Chave: Perfuração. Brocas. Eficiência. Carvão Mineral. Desgaste.

1. INTRODUÇÃO

No processo de extração de carvão, a perfuração se realiza com o propósito de colocar explosivos de detonação ou colocar fixadores de teto. O incremento da produtividade neste processo depende do desempenho das brocas e da operação eficiente na perfuração. Por tanto, a melhoria nesta

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: everton.renner@hotmail.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail:elvys.curi@satc.edu.br

atividade basicamente, se relaciona com otimizar os parâmetros de velocidade e pressão para obter a maior eficiência na perfuração, assim como de reduzir o coeficiente de atrito e o desgaste das ferramentas de corte.

O processo com perfuração contínua, com a mesma broca, permite incrementar a produção na usinagem, mas o tempo de uso depende do desgaste do fio das brocas. O desgaste prejudica a produtividade, não só pela interrupção da atividade, também porque a afiação do bit reduz sua dimensão.

No caso de brocas de pequenas dimensões, os custos por troca desta ferramenta são pequenos, porém em brocas de diâmetros maiores a 25 mm, os custos são altos. A recuperação das brocas ou métodos para o incremento do tempo de vida para que opere de maneira contínua, deve ser explorado, determinando as melhores práticas de operação assim como a velocidade e carga mais apropriada.

O Centro Universitário UniSATC, junto ao projeto FAPESC, iniciou o projeto de pesquisa que avalia a eficiência dos rotores de bombas centrífugas e brocas mineradoras, visando o crescimento econômico das empresas mineradoras de carvão. O projeto foi dividido em três temas distintos, revestimento resistente a abrasão para os rotores de bombas centrífugas, recuperação das brocas de perfuração desgastadas, e o desenvolvimento de uma máquina de afiação para aumentar a eficiência das brocas.

Analisar a eficiência na perfuração requer avaliar os parâmetros de corte de força velocidade e potência, complementando-se com a avaliação da eficiência de corte. Extrair informação destes parâmetros requer de estudos em laboratórios com equipamentos apropriados que forneçam dados instantâneos durante um processo de corte. Para avaliar o desgaste

O objetivo deste trabalho é avaliar os parâmetros de perfuração das brocas usadas nas empresas mineradoras de extração de carvão mineral, utilizando uma bancada instrumentada. Os dados de velocidade de rotação, a força de corte e de avanço e de intensidade de corrente, permitem avaliar a eficiência de perfuração e o consumo de energia. Também se avalia o desgaste das brocas analisando a superfície do gume com um microscópio e avaliando as perdas de massa destas. Os resultados permitiram avaliar para que condições de uso as brocas perfuraram.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

O estudo do consumo de energia, relacionado com atrito e desgaste, desde a perspectiva de perfuração, usando brocas com bits de carboneto de tungstênio é abordado neste capítulo. Com o propósito de relacionar estas informações ao aumento da vida útil das brocas usadas nas atividades de perfuração nas minas de carvão se estuda os conceitos de eficiência de perfuração e seus parâmetros de velocidade e força de avanço e de corte.

2.1 CONSUMO DE ENERGIA

Holmberg (2017) comenta que o consumo total de energia nas atividades de mineração globais, incluindo mineração de minerais e rochas, se estima em 6,2% do consumo da energia global. Próximo de 40% da energia consumida na mineração mineral (equivalente a 4,6 EJ anualmente em escala global) é usada para superar o atrito. Além disso, 2 EJ são usados para repor e substituir peças gastas, reservar e estocar peças e equipamentos necessários devido a falhas de desgaste. As perdas econômicas totais estimadas resultantes da mineração de minérios por atrito e desgaste são de 210.000 milhões de euros anuais, distribuídos como 40% para superar o atrito, 27% para a produção de peças e equipamentos de reposição, 26% para trabalhos de manutenção e 7 % para perda de produção.

2.2 DESGASTE DOS BITS

Com respeito ao desgaste dos bits das brocas de perfuração, composto de WC-Co cementado, Jones, (2017) verificou que na superfície dos bits de uma broca de teto houve perda de cobalto (Co), alteração na química das demais regiões do ligante, assim como na morfologia dos grãos WC. As altas temperaturas e pressões durante a perfuração afetaram a microestrutura do metal duro dependendo dessas características superficiais. A formação de CoSi_2 , por difusão do Co, abaixo da superfície da broca e fusão local desta,

remove o suporte dos grãos de WC circundantes, isto acelera o desgaste por fratura e promove a remoção em fragmentos WC.

Por outro lado, Katiyar (2016) verificou que a vida útil de uma ferramenta WC-Co é aumentada de várias maneiras. Isso inclui a composição e as propriedades termofísicas do carboneto, seja pela geometria e/ou o design dos componentes, a montagem e os ambientes mecânicos e químicos em que opera, estes fatores afetariam a vida útil das ferramentas. O desgaste abrasivo ou o problema de erosão são superados pelo teor de aglutinante (Co, Ni) inferior, e grãos de WC muito finos causam alta dureza, isto incrementa a resistência ao desgaste.

Dewangan (2015) categorizou as rachaduras provenientes da mineração nas ferramentas em três partes, tais como, rachaduras por superfícies sobrepostas, por ter grande a superfície de CC (Cemented Carbide) e rachaduras nos grãos de WC. Além disso, relatou um tipo diferente de mecanismo, fadiga por superfícies sobrepostas. Os choques repentinos ocasionam grande impactos na ferramenta, impostos pelo carvão quebradiço, o material rochoso é a principal causa da geração de fissuras. Impactos contínuos causam ação de esmagamento severa nas partes rachadas. Facilitando a fragmentação do grão.

2.3 POTÊNCIAS DE UMA MÁQUINA ROTATIVA

Segundo Norton (2013) em qualquer sistema rotativo, a potência instantânea é o produto do torque e da velocidade angular, como apresenta a Equação (1):

$$P = T\omega \quad (1)$$

Onde:

T = Torque produzido no funcionamento (N.m);

ω = Velocidade angular (rad/s).

A velocidade angular, em função da velocidade de rotação em rpm, se calcula com a equação (2):

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} \quad (2)$$

Onde:

n = Velocidade de rotação do eixo da ferramenta (rpm)

O torque e a velocidade angular podem variar com o tempo. Em tais casos, a potência média é encontrada com o seguinte modelo (NORTON, 2013):

$$P_{Média} = T_{Média} \omega_{Média} \quad (3)$$

O motor elétrico trifásico de uma máquina de usinagem, a carga pode estar instalada em estrela ou em triângulo, nestes casos, o valor da potência ativa total é representado pela equação, (BARBOSA, 2019)

$$P_m = \sqrt{3} V_L I_L \cos\theta \quad (4)$$

Onde:

P_m = Potência fornecida pelo motor elétrico a uma máquina (W);

V_L = Tensão elétrica da linha de alimentação (V);

I_L = Intensidade de corrente da linha de alimentação (A);

$\cos\theta$ = Ângulo de fase do motor elétrico, indicado na placa deste (-).

2.4 POTÊNCIAS, FORÇAS E VELOCIDADES DE UMA BROCA HELICOIDAL

Um dos parâmetros mais decisivos para o desenvolvimento dos cálculos, é a definição de Potência de corte. Ela é afetada diretamente pelas forças de usinagem, sua capacidade para atingir o objetivo de tolerâncias ajustadas,

temperatura atuante no sistema e o desgaste da ferramenta. (DINIZ et al. 2013).

Em um processo de usinagem, a potência de corte se calcula em função da força de corte e da velocidade de corte (DINIZ et al. 2013). A equação (5) apresenta o modelo matemático de cálculo da potência de corte:

$$P_c = \frac{F_c v_c}{60 \times 10^3} \quad (5)$$

Onde:

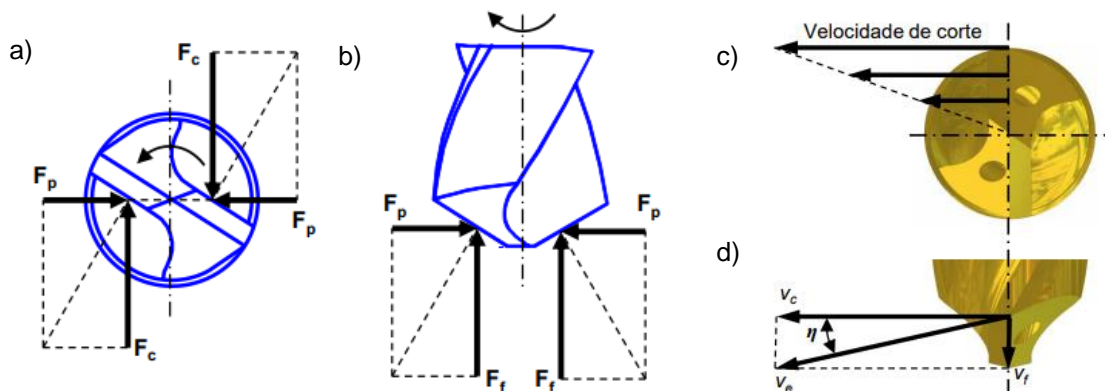
P_c = Potência de corte (kW);

F_c = Força de corte (N);

v_c = velocidade de corte (mm/min).

A Fig. 01 apresenta os componentes dinâmicos de uma broca helicoidal no processo de furação.

Figura 01: Componentes da broca helicoidal a) Forças vista inferior b) Forças vista lateral c) Velocidade de corte vista inferior d) Velocidades da broca



Fonte: Adaptado de (BOEIRA, 2012) e (Souza, 2014)

Segundo a norma DIN 6580, a velocidade de corte v_c , se relaciona com a velocidade angular ω da broca, variando com o raio, de um valor máximo

na periferia até um valor nulo no centro da broca. Com informação da velocidade de avanço v_f é possível definir a velocidade efetiva v_e , (BOEIRA, et al. 2012)

O modelo de cálculo da velocidade de corte é apresentado pela Equação (6):

$$v_t = \omega r \quad (6)$$

Onde:

r = raio equivalente da broca (m).

Uma máquina-ferramenta consome potência para girar seu eixo-árvore e executa o movimento de corte e promove o movimento de avanço (DINIZ, 2013).

A força de usinagem F , é a resultante composta pelas forças de corte (F_c), passiva (F_p) e de avanço (F_f) provocadas pela reação aos movimentos de rotação da ferramenta e de avanço (SOUSA, 2014).

A potência de avanço se calcula com a Equação (7)

$$P_f = \frac{F_f v_f}{60 \times 10^3} \quad (7)$$

Onde:

P_f = Potência de avanço (kW);

F_f = Força de avanço (N);

v_f = velocidade de avanço (mm/min);

2.7 RENDIMENTO

Nas máquinas operatrizes que apresentam um único motor para o movimento de corte e avanço, com a potência de corte maior que a potência de avanço (DINIZ, 2013).

O cálculo do rendimento é a relação da potência de corte e da potência do motor, como se apresenta na Equação (8):

$$\eta_u = \frac{P_c}{P_m} \quad (8)$$

Onde

η_u = Rendimento da máquina operatriz (-);

P_c = Potência de corte (W);

P_m = Potência do motor elétrico (W).

De Oliveira (2011), define o rendimento de um motor de indução, trifásico, como a relação entre a potência de saída e a potência de entrada. O rendimento se calcula com a equação (9):

$$\eta_s = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (9)$$

2.8 TORQUE NAS TRANSMISÕES

Segundo Melconian (2019), o torque de uma máquina se define como o produto de uma força tangencial pelo raio. A Equação (10) mostra o modelo de cálculo.

$$T = F_t \cdot R_a \quad (10)$$

Onde:

T = Torque de um eixo giratório (n.m);

F_t = força tangencial (N);

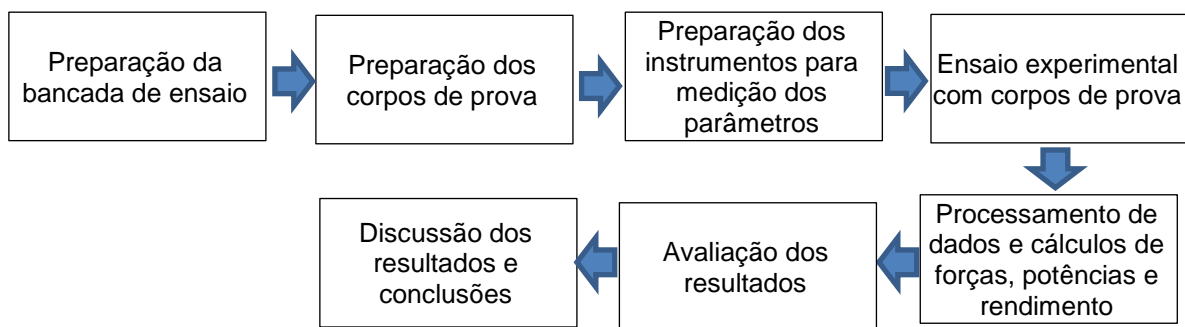
R_a = Raio da força tangencial ao centro do eixo (m).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para dar prosseguimento no estudo de desgaste e atrito que se produzem nas brocas mineradoras de carvão, se implementou no Laboratório de Engenharia da Superfície e Tribologia (LAEST) uma bancada de ensaios. A instrumentação da bancada se realizou no laboratório de Vibrações e tribologia (LAVITRI).

Este equipamento basicamente consiste em uma furadeira de coluna, onde se instalariam as brocas e corpos de prova, que perfurariam alguns tijolos e corpos de prova. Por tanto, o procedimento para adquirir dados para este trabalho dependeu tanto de equipamentos mecânicos, eletrônicos além da matéria prima que seria utilizada nos ensaios. A Fig. 2, apresenta a sequência de atividades desenvolvida para avaliar o desempenho das brocas mineradoras.

Figura 02: Fluxograma das atividades do procedimento experimental



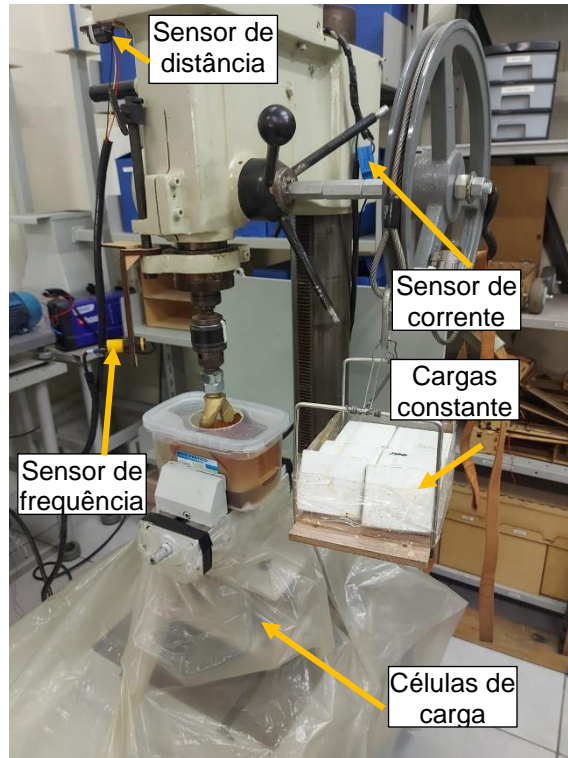
Fonte: O autor 2023

3.1 BANCADA DE ENSAIOS

Para extrair informação dos parâmetros de corte, atrito e desgaste, a bancada foi instrumentada com sensores, estas levantam informação como sinais no domínio do tempo. Com os ensaios de perfuração, se obteriam dados de velocidade, força de atrito, força de avanço, temperatura, torque e corrente

elétrica consumida durante os testes. A Fig. 3 apresenta a bancada com as cargas na roldana de manipulação e a broca de 45 mm em teste.

Figura 03: Bancada de ensaio montada com corpo de prova.



Fonte: Autor (2023).

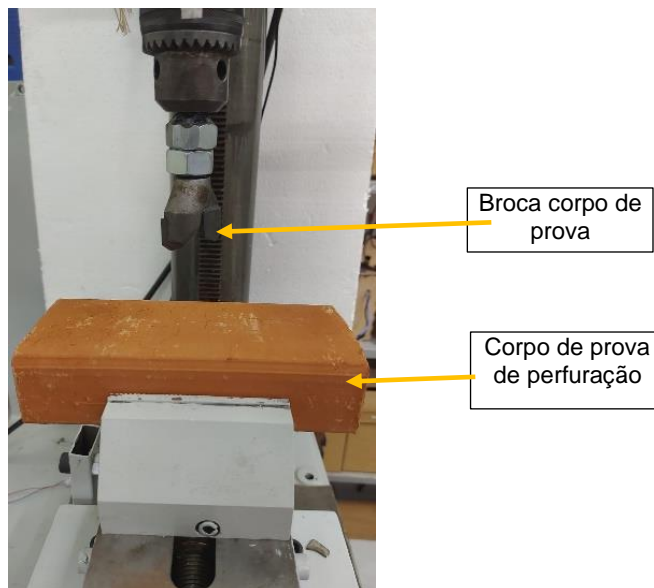
Nos ensaios, se utilizaria corpos de prova que representam uma dureza média de o que se encontraria em um meio heterogêneo como são as superfícies perfurados pelas brocas mineradoras. O estudo desses parâmetros é importante para avaliar o desempenho das brocas em função dos melhores parâmetros de velocidade e força de avanço. Deste modo, pode se avaliar as melhorias nos processos, assim como aumentar a eficiência no processo produtivo. Durante os ensaios, foi possível avaliar o coeficiente de atrito, temperatura e o desgaste das brocas. Posteriormente foi feita a correlação dentre cada fator atuante na broca e sua subsequente influência no consumo de energia e vida útil. A determinação destes parâmetros permitirá orientar o processo de perfuração, visando o incremento de vida útil das brocas e redução do consumo de energia.

A extração dos dados, dos parâmetros de perfuração são realizados usando diferentes tipos de sensores, sendo entre eles duas células de carga tipo S para medir a força de avanço, uma célula de carga do mesmo modelo para medir a força tangencial, sensor de corrente para medir a variação de corrente, sensor infravermelho para a taxa de penetração no corpo de prova e sensor que mede a temperatura da superfície da broca, assim como o sensor de velocidade de rotação.

3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A definição do corpo de prova a ser utilizado se deu a partir da necessidade de realizar inúmeros testes em um material homogêneo e de fácil acesso, dessa forma, foi selecionado tijolos, conforme Fig. 04, como material para realizar os ensaios de desgaste das brocas de mineração.

Figura 04: Tijolo montado na bancada de ensaio.



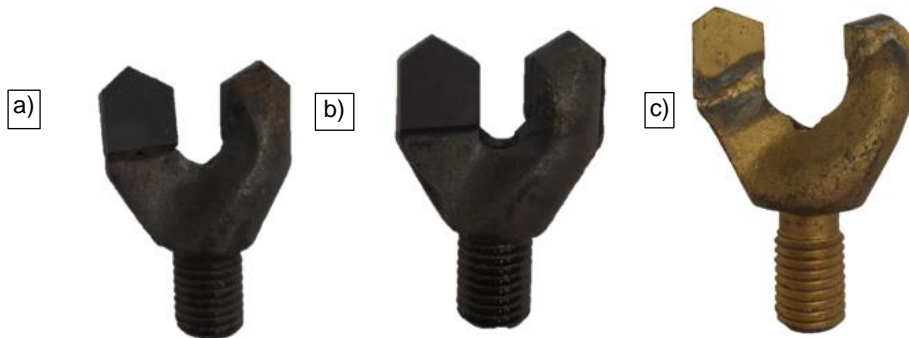
Fonte: Autor (2023).

A fixação dos corpos de prova se realizou usando uma morsa centralizadora, logo os tijolos foram perfurados por brocas mineradoras do tipo bit borboleta e bit pastilha de diâmetros diferentes, disponíveis comercialmente. As brocas do tipo borboleta, são apresentadas na Fig. 05, foi trabalhado com

os diâmetros de 42 mm, 45 mm e 64mm, já a tipo pastilha, mostrados na Fig. 06, foi utilizado nos diâmetros de 26 mm e 29 mm.

Figura 05: Bit de mineração para colocação de cargas explosivas.

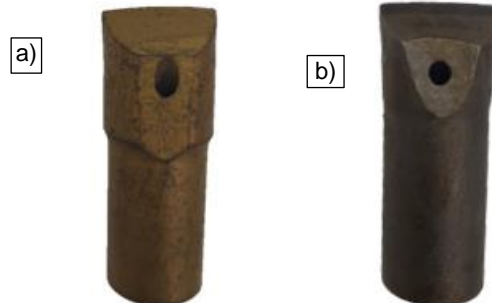
a) 42 mm, b) 45 mm e c) 64 mm.



Fonte: Autor (2023).

Figura 06: Bit para colocação de parafusos de teto.

a) 26 mm b) 29 mm.



Fonte: Autor (2023).

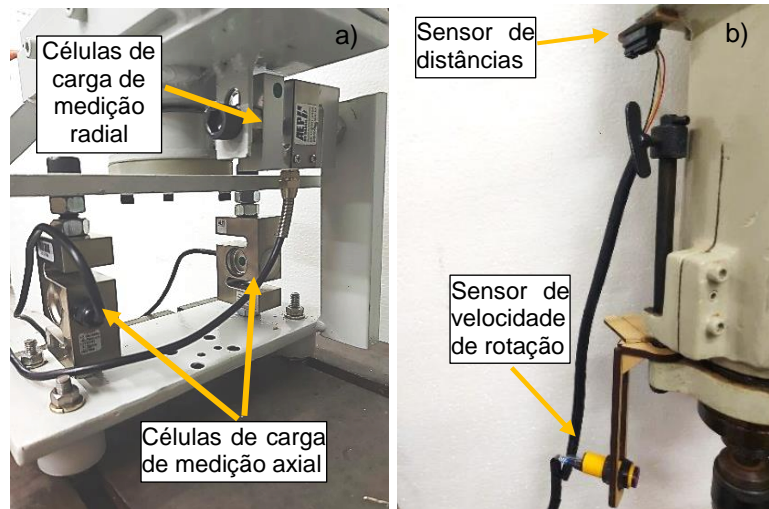
3.3 PREPARAÇÃO DOS INSTRUMENTOS E MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS

Para obtenção dos dados dos ensaios foram utilizados sensores de medição, sendo eles: células de cargas, sensor de distância, de rotação e de corrente, juntamente com uma câmera térmica para análise dos corpos de prova.

Foram instaladas 03 células de carga, tal como o mostra a Fig. 06-a, com o intuito de analisar as forças aplicadas durante o processo de furação, força tanto axial ou de avanço quanto a força tangencial que se

relaciona com a força de corte. O sensor de distância, mostrada na Fig. 06 b, serviu para análise da taxa de penetração no corpo de prova e para a velocidade de rotação.

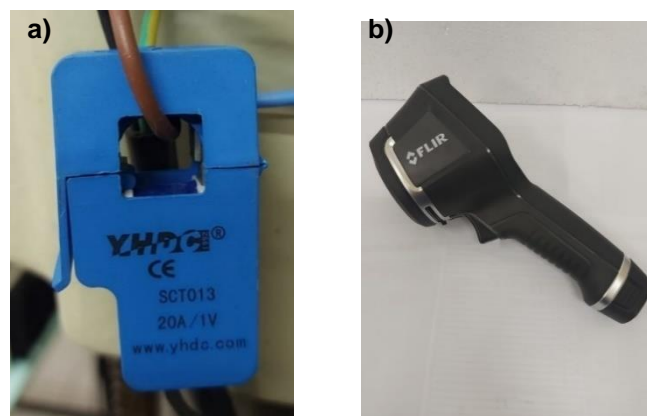
Figura 06: a) Células de cargas instaladas b) Sensor de distância e sensor de frequência c) Sensor de corrente.



Fonte: Autor (2023).

Já o sensor de corrente, Fig. 07 a, foi instalado como função de análise da mudança de corrente conforme o corpo de prova era perfurado para análise da eficiência energética. E para análise da variação de temperatura após a realização dos furos, foi utilizado uma câmera térmica, Fig. 07 b.

Figura 07: a) Sensor de corrente b) Câmera térmica FLIR.



Fonte: Autor (2023).

Todos os sensores utilizados foram analisados conforme a Tab. 01, relacionando o instrumento juntamente com o modelo utilizado na bancada.

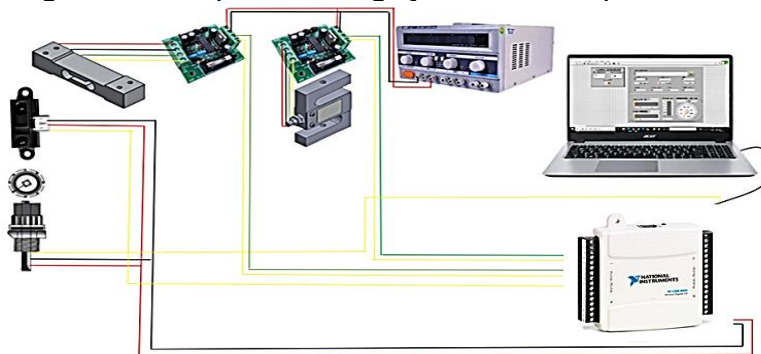
Tabela 01: Lista de sensores utilizados.

Sensor	Modelo	Função
Célula de carga 500 kg	AEPH universal TSA "TYPE S"	Obter a força axial do sistema.
Célula de carga 100 kg	AEPH universal TS "TYPE S"	Obter a força radial do sistema.
Sensor de distância	Sharp 2Y0A21	Medir a taxa de penetração do bit no corpo de prova.
Sensor de rotação	Mieng E18DNK	Aferir a velocidade de rotação.
Sensor de corrente	YHDC SCT013 20 A/1V	Medir os picos de energia de acordo com a profundidade e rotação.
Câmera infravermelha	Flir ex-series E6XT	Medir a temperatura e obtenção de imagens infravermelhas.

Fonte: Autor (2023).

Conforme a Fig. 08, o funcionamento do sistema é garantido com os transdutores ligados juntos aos condicionadores de sinal (amplificadores, fontes e filtros), uma placa analógica-digital da marca National Instruments® e um computador com o *software* LabVIEW®. Os sinais são incorporados pelo *software* LABVIEW® e na leitura foram registrados como arquivos .txt de forma que em uma coluna estarão os dados de tempo e em outras os valores de entrada dos demais sensores. Os sinais são processados no *software* Excel®, e representados graficamente, além de conferidos com melhor facilidade. O esquema abaixo demonstra como foram feitas as ligações para as medições.

Figura 08: Esquema de ligações dos componentes.



Fonte: Autor (2023).

Os dados foram adquiridos por transdutores que mediram o torque, deslocamento e conseqüentemente o avanço, rotação, corrente e temperatura.

A calibração dos sensores foi realizada no *software* LabVIEW, onde cada sensor apresenta uma equação da reta que representa o seu comportamento.

3.4 ENSAIO EXPERIMENTAL COM CORPOS DE PROVA

Os ensaios foram realizados conforme a Tab. 02, onde foram realizados para cada diâmetro do bit 20 diferentes ensaios, sendo estabelecida uma rotação de trabalho e aplicando 5 diferentes cargas nessa rotação para obtenção de dados. Dessa forma, foram realizados os ensaios nas rotações de 160, 220, 320 e 440 rpm, e aplicando as cargas na roldana de manipulação da furadeira de 5, 4,5, 4, 3,5 e 3 kg para cada rotação. Considerando os bits a serem trabalhados de 26, 29, 42 e 45 mm de diâmetro foi totalizado em 80 o número de ensaio realizados para obtenção de dados. A broca de 64 mm não teve resultados, devido às limitações da potência da furadeira não foi apropriada para perfurar os tijolos, nos primeiros ensaios se travou a broca no tijolo.

Tabela 02: Relação dos ensaios realizados.

Rotação (RPM)		Carga (kg)			
160	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0
220	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0
320	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0
440	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0

Fonte: Autor (2023).

3.5 PROCESSAMENTO DE DADOS E CÁLCULOS DE FORÇAS, POTÊNCIAS E RENDIMENTO

A partir dos dados obtidos dos sensores durante os ensaios, os cálculos foram realizados conforme as equações 1 a 10, expostas na fundamentação teórica. Dessa forma, através dos resultados de forças, potências e rendimentos foram produzidos gráficos e tabelas utilizando o *software* Excel® para organizar e apresentar os resultados de forma clara e objetiva.

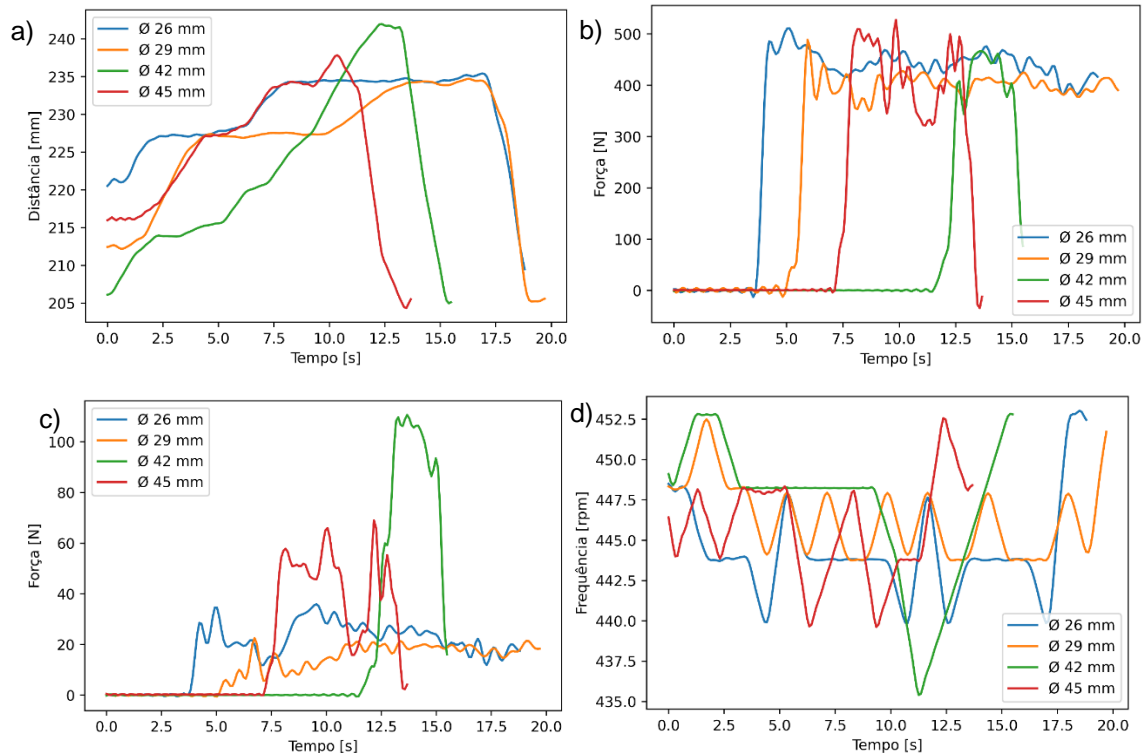
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse tópico foram calculados alguns parâmetros de perfuração, após foi analisado e comentado por meio de gráficos desenvolvidos a partir dos sinais. Foram analisados a coerência de sinais obtidos pelos sensores da bancada, tais como a potência de corte e avanço, rendimento de corte obtido por cada broca foi analisado também o desgaste produzido após dos ensaios.

4.1 COLETA E ANÁLISE DE SINAIS

A obtenção de dados dos sinais de distância de avanço, força de avanço, força de corte e a velocidade de rotação, ocorreu de forma coerente durante o processo de leitura nos ensaios da bancada, como pode ser analisado na Fig. 09, os resultados da broca borboleta (Φ 45 e 42 mm) e as brocas de pastilha (Φ 26 e 29 mm).

Figura 09: Gráficos dos sensores trabalhando a rotação de 440 rpm e utilizando uma carga constante de 5 kg. a) Sensor de distância, b) Força de avanço, c) Força tangencial do momento, d) Sensor de frequência



Fonte: Autor (2023).

Analisando o gráfico na Fig. 09-a, pode-se perceber que o diâmetro de 42 mm, representado pela cor verde, teve uma maior velocidade de avanço, tendo em vista que a broca penetrou a mesma distância em um menor tempo.

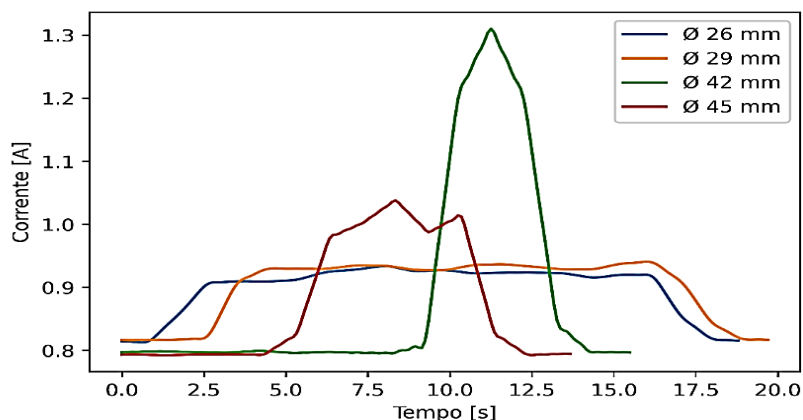
O gráfico de força de avanço, Fig. 09-b, não apresentou grande variação entre os diâmetros de brocas trabalhadas, já que a carga atuante era de 5 kg para todos os diâmetros analisados nesse ensaio.

Já o estudo de força tangencial do momento, Fig. 09-c, apresentou uma maior força no diâmetro de 42 mm, representado pela cor verde, tendo em vista que esse mesmo diâmetro apresentou uma maior velocidade de avanço, resultando em uma maior força de impacto, essa maior força tangencial pode causar um maior desgaste da broca em relação as outras.

Analisando a variação de frequência durante o ensaio, Fig. 09-d, pode-se perceber que houve desacelerações ou redução da velocidade, em relação a rotação inicial à medida que o avanço da broca encontrava algum tipo de dificuldade durante a furação do tijolo. Na broca de Φ 42 mm foi notável a queda de velocidade.

Todos os instrumentos instalados na bancada podem ser dados como coerentes a partir da análise do gráfico da Fig. 10, relacionando a variação de corrente durante os ensaios realizados.

Figura 10: Sensor de corrente, utilizando a frequência de rotação de 440 rpm e uma carga constante de 5 kg.



Fonte: Autor (2023).

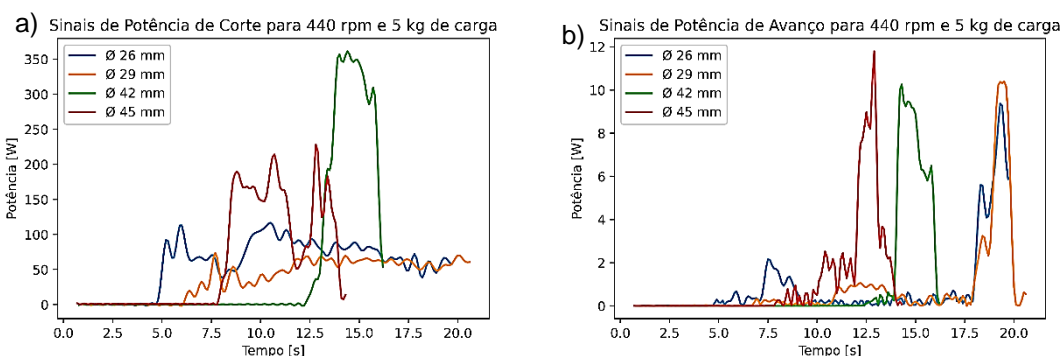
Os dados extraídos do sensor de corrente comprovam que os instrumentos estavam com uma calibração coerente, tendo em vista que a broca de Φ 42 mm, representada pela cor verde no gráfico da Fig. 10, que anteriormente apresentou uma maior velocidade de avanço e uma maior força tangencial, também apresentou uma maior necessidade de corrente para realizar a furação chegando próximo a 1,3 A.

4.2 ANÁLISE DA POTÊNCIA DE CORTE E AVANÇO

Realizando o processamento de dados, obtidos dos sensores instalados na bancada e calculando as potências corte e de avanço por meio da Eq. 9, presente na fundamentação teórica, foi possível o desenvolvimento de um gráfico, Fig. 11, representando ambas as potências quando trabalhadas na rotação de 440 rpm e aplicando uma carga de 5 kg na roldana de manipulação da broca.

A potência de corte foi calculada com a equação 1, 2, 3 e 10, usando os sinais da célula de carga de medição radial e os sinais de velocidade de rotação. Enquanto a potência de avanço foi calculada usando a equação 6 e 7, utilizando os dados da célula de carga axial e os dados do sensor de distância e o tempo de avanço, com esses dados foi calculado a velocidade de avanço e posteriormente a potência de avanço.

Figura 11: Gráficos de potência quando aplicada uma frequência de rotação de 440 rpm e uma carga constante de 5 kg a) Potência de corte, b) Potência de avanço.



Fonte: Autor (2023).

Em análise do gráfico da Fig. 11-a, se observa que os maiores diâmetros das brocas apresentaram uma maior potência de corte, dando destaque para broca de Φ 42 mm, está apresentou uma potência de corte máxima de 700 W resultado diretamente proporcional a força tangencial obtida durante os ensaios realizados.

Já em relação a potência de avanço, Fig. 11-b, todos os diâmetros apresentaram uma potência similar tendo em vista que todos trabalharam com a mesma carga constante de 5 kg, na roldana de manipulação da furadeira.

4.3 ANÁLISE DE RENDIMENTO DE CORTE E CONSUMO DE ENERGIA

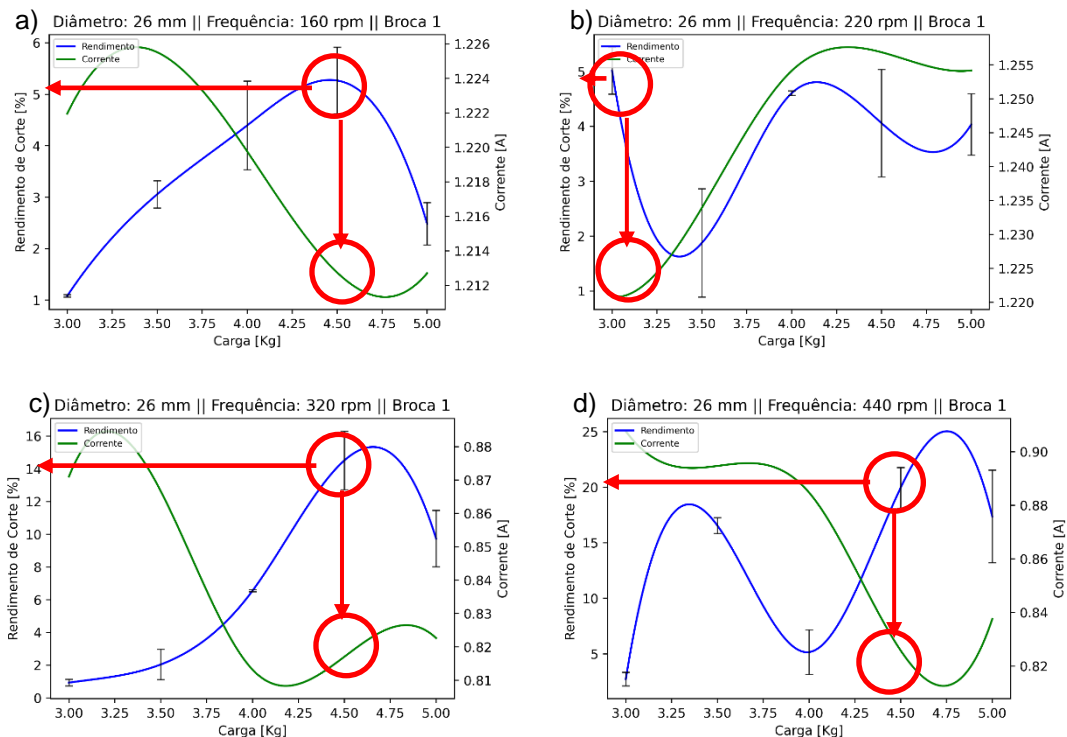
O rendimento médio do processo de perfuração, foi calculado a partir da equação 10, exposta na fundamentação teórica. A partir dos dados obtidos dos sinais, foram desenvolvidos gráficos representando o rendimento de corte em relação ao diâmetro trabalhado, a frequência de rotação atuante e diferentes cargas constantes aplicadas durante o ensaio.

Analisando primeiramente a broca tipo pastilha de Φ 26 mm, na Fig. 12, se percebe a variação de rendimento de corte em diferentes velocidades de rotação e aplicando diferentes cargas, a linha azul relaciona os resultados do rendimento para a broca funcionando a velocidade constante e com diferentes cargas.

Outra análise interessante foram os resultados do sensor de corrente. Este informa o comportamento do consumo de corrente médio para cada condição de ensaio. A linha verde vincula os resultados da corrente média, os valores foram colocados no eixo esquerdo. A potência utilizada pelo motor durante o processo de corte foi calculada utilizando a Eq. 4, nesta se observa que os dados de tensão foi 380 V, e o cosseno do ângulo da potência ativa foi extraído do motor que informa o valor de 0,8. O sinal de corrente é proporcional à potência do motor, por tanto se a corrente se incrementa o consumo de energia se incrementa.

Quando o rendimento é alto e a intensidade é baixa para um grupo de ensaio, se obtém a melhor condição de funcionamento. O melhor desempenho das brocas é observado quando se avalia os gráficos, e constata a existência do maior rendimento e com menor valor de corrente consumida.

Figura 12: Rendimento de corte e corrente da broca de Φ 26 mm em relação a frequência e carga aplicada. a) 160 rpm, b) 220 rpm, c) 320 rpm, d) 440 rpm.



Fonte: Autor (2023).

Em análise a rotação de 160 rpm, Fig. 12 a, o maior rendimento de corte é alcançado quando a broca de 26 mm de diâmetro está sendo atuada por uma carga constante de 4,5 kg, apresentando rendimento próximo a 5%. Já a rotação de 220 rpm, Fig. 12 b, o rendimento apresentou um resultado semelhante a 160 rpm próximo a 5%, mas com a menor carga, 3 kg.

Trabalhando com a frequência de rotação de 320 rpm, Fig. 12-c, a aplicação da carga de 4,5 kg foi a que apresentou melhor resultado no rendimento de corte, próximo a 14%.

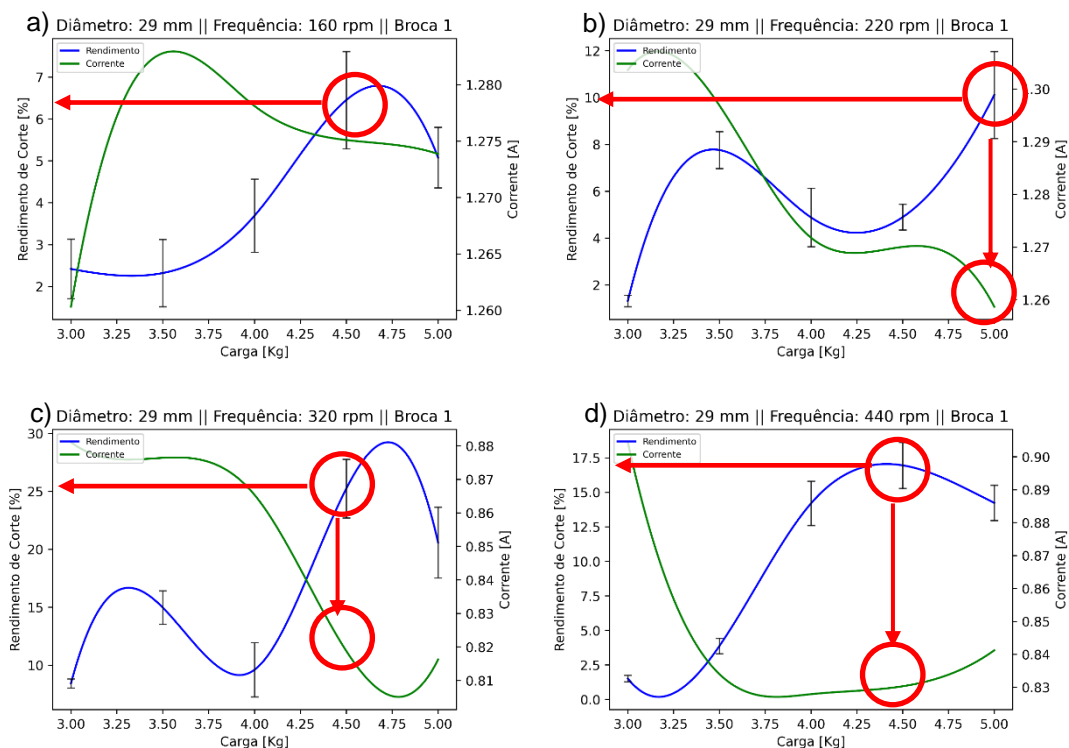
Por fim, com a rotação de 440 rpm e aplicando uma carga constante de 4,5 kg, como se observa na Fig. 12-d, a broca que apresentou um

melhor rendimento de corte dentre todas as outras, chegou próximo a um rendimento quase 20% em dois tipos de carregamento. Com a menor carga o consumo de corrente foi alto, porém, com a maior carga se obteve menor consumo de corrente, por tanto, este seria o melhor resultado para os ensaios. Não foi testado cargas maiores por causa da limitação de potência da máquina.

No geral, os gráficos deixaram claro que quanto maior a frequência de rotação maior será o rendimento de corte em relação a carga aplicada.

Na Fig. 13, se mostra os resultados gráficos de rendimentos de corte da broca tipo pastilha de Φ 29 mm, assim como o consumo de corrente.

Figura 13: Rendimento de corte e corrente da broca de Φ 29 mm em relação a frequência e carga aplicada. a) 160 rpm, b) 220 rpm, c) 320 rpm, d) 440 rpm.



Fonte: Autor (2023).

Analisando os resultados obtidos dos rendimentos da broca de 29 mm de diâmetro, conforme a Fig. 13-a, a rotação de 160 rpm apresentou um maior rendimento de corte quando aplicada uma carga de 4,5 kg, apresentando um rendimento de 6,5 % para a de corrente elétrica de 1,275 A.

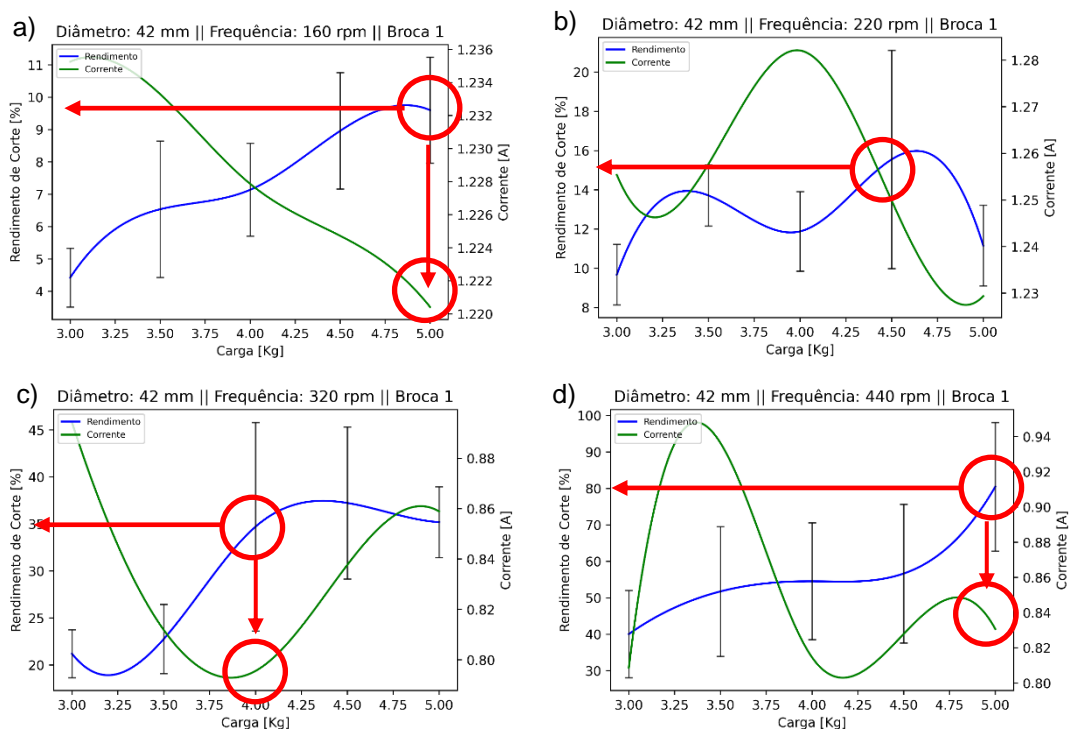
Em análise a rotação de 220 rpm, Fig. 13-b, a broca quando aplicada a uma carga de 4,5 kg apresentou um rendimento de corte melhor de aproximadamente 10% para a corrente elétrica de 1,26 A.

Já a frequência de rotação de 320 rpm, Fig. 13-c, apresentou um melhor resultado quando aplicada uma carga de 4,5 kg representando um rendimento próximo a 25% para a corrente elétrica de 0,82 A. Sendo o maior rendimento detectado para este diâmetro de broca além de menor consumo de corrente elétrica, o que mostra o melhor desempenho para esta broca.

A Fig. 13-d representa os resultados da rotação de 440 rpm, demonstrando que essa rotação somada a carga constante de 4,5 kg, apresentou rendimento de aproximadamente 17% com uma corrente de 0,83 A.

Alterando o diâmetro e tipo de broca em análise, a Fig. 14 representa os rendimentos de corte da broca tipo borboleta de Φ 42 mm.

Figura 14: Rendimento de corte e corrente da broca de Φ 42 mm em relação a frequência e carga aplicada. a) 160 rpm, b) 220 rpm, c) 320 rpm, d) 440 rpm.



Fonte: Autor (2023).

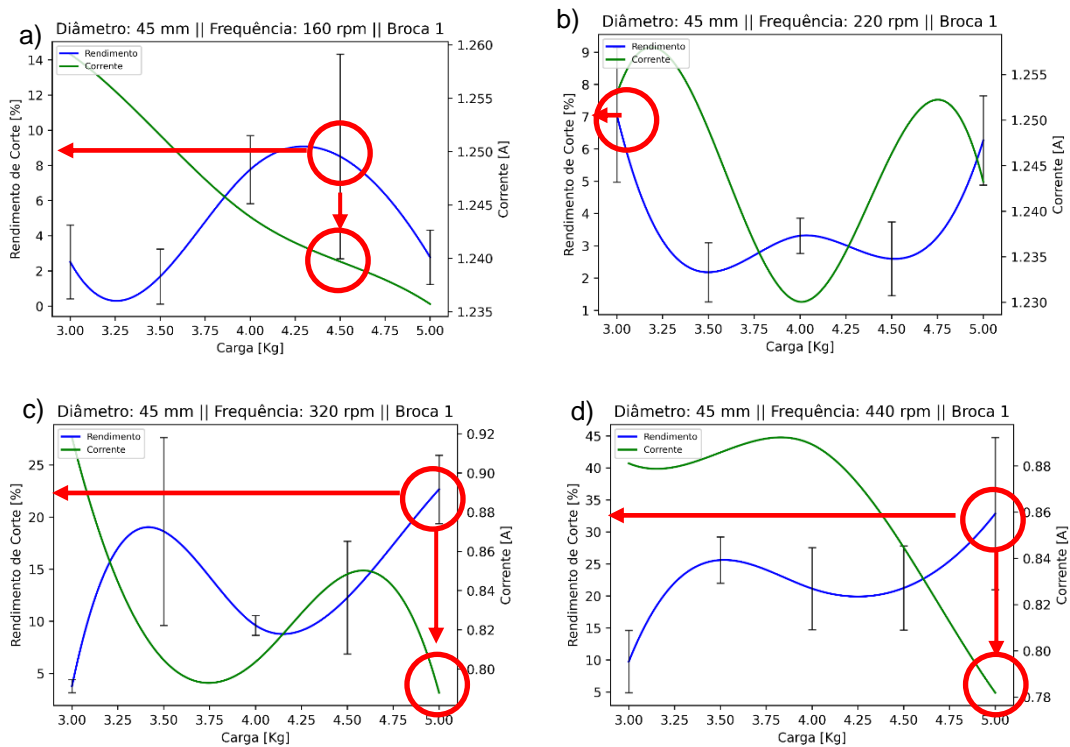
O primeiro gráfico, a Fig. 14-a, representa o rendimento de corte da broca de 42 mm na rotação de 160 rpm, apresentando um rendimento de corte próximo a 10% para a carga de 5 kg aplicada e a corrente de 1,23 A.

A rotação de 220 rpm, Fig. 14-b, apresenta um rendimento de corte máximo de 15% quando aplicado a carga de 4,5 kg para a corrente de 1,25 A. Já a rotação de 320 rpm, conforme a Fig. 14-c, quando aplicada a carga máxima de 4 kg apresentou uma melhor resposta do rendimento de corte em torno de 35%, para uma corrente de 0,8 A.

O gráfico representado pela Fig. 14-d, apresentou um rendimento de 80%, para a carga constante de 5 kg e a corrente próximo a 0,33 A. Pelo tanto, o melhor desempenho foi com o rendimento o valor de 80% e menor consumo de energia foi com a carga de 5 kg com a corrente média de 0,83 A.

Analisando o último diâmetro trabalhado, a Fig. 15 representa os rendimentos de cortes obtidos da broca tipo borboleta de Φ 45 mm.

Figura 15: Rendimento de corte e corrente da broca de Φ 45 mm em relação a frequência e carga aplicada. a) 160 rpm, b) 220 rpm, c) 320 rpm, d) 440 rpm.



Fonte: Autor (2023).

A Fig. 15-a, representa o rendimento de corte da broca de 45 mm na rotação de 160 rpm, apresentando um rendimento máximo de 9% quando aplicado uma carga de 5 kg. A corrente média registrada foi de 1,25 A.

Já a Fig. 15-b, representa a rotação de 220 rpm e demonstra que o maior rendimento foi por volta de 7% quando aplicado a menor carga, 3 kg. A corrente média registrada também foi de 1,25 A

Analisando a rotação de 320 rpm, Fig. 15 c, a broca ensaiada apresentou um rendimento de corte máximo de 22% quando aplicado a máxima carga, 5 kg. Nessa carga o consumo de corrente médio deu 0,89 A.

Por fim, a Fig. 15-d representa a máxima rotação ensaiada com a broca de 45 mm de diâmetro, apresentando um rendimento de corte próximo a 33% quando aplicado a uma carga constante de 5 kg, mas o consumo de corrente foi o mais baixo, pero de 0,78 A. Nesta condição estaria o melhor desempenho deste corpo de prova.

Nas brocas tipo pastilha, para o diâmetro de 26 mm foi com a carga de 4,5 e velocidade de 440 rpm, teve 20% de rendimento. Enquanto isso, para as brocas de 29 mm com carga de 4,5 e com a velocidade de 320 rpm que se obteve 25% como o melhor resultado. Enquanto isso, nas brocas do tipo borboleta os melhores resultados foram com a maior carga, nestes casos de 5 kg, sendo para a broca de Φ 42 mm na velocidade de rotação de 440 rpm o rendimento chego próximo de 80% para uma corrente de 0,83 A. A outra broca borboleta de Φ 45 mm seu rendimento foi de 33% para a carga de 5 kg e na velocidade de 440 rpm, com a corrente um pouco mais de 0,78 A.

Destaca-se como o melhor resultado, a operação de perfuração realizada com a broca borboleta de Φ 42mm, com a carga de 5 kg e com a velocidade de 320 rpm.

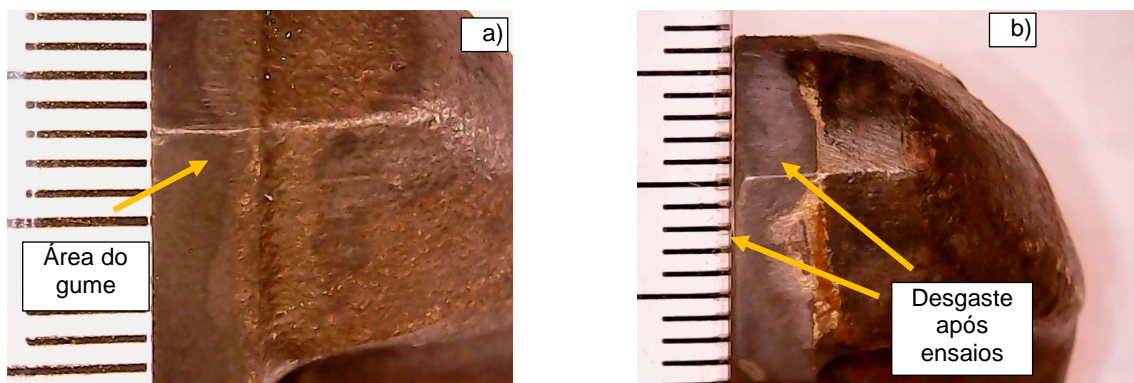
No consumo de corrente as brocas tipo pastilha consumiram um pouca mais de corrente, embora que seu diâmetro era menor (Φ 26 e Φ 29 mm). No caso das brocas tipo borboletas (Φ 42 e Φ 45 mm) os melhores resultados foram com a maior carga e com a velocidade de 320 e 440 rpm. Embora que os valores de rendimentos sejam baixos, a causa dessas perdas de potência são ocasionadas pela redução da velocidade entre o motor e o eixo arvore.

A geometria diferente influenciou nestes resultados, apresentando menor consumo de corrente na maioria dos ensaios com as brocas tipo borboletas.

4.4 ANÁLISE DE DESGASTE

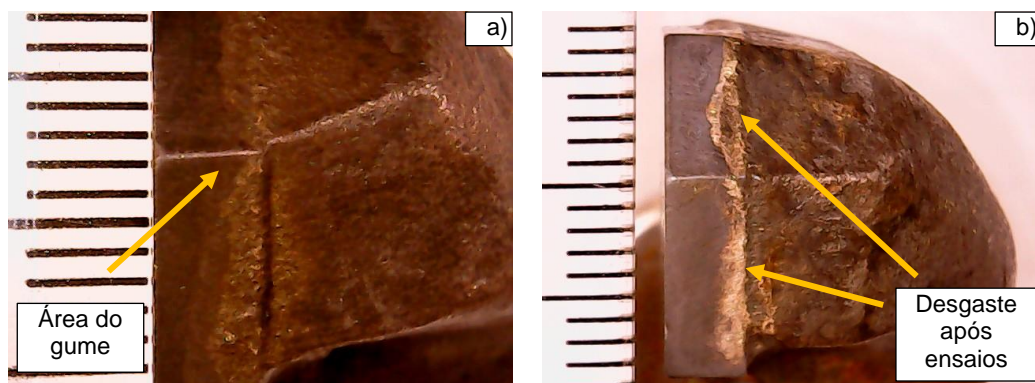
Para análise de desgaste, foi realizado uma imagem da superfície de um dos diâmetros de cada tipo de broca, do tipo bit de borboleta e do tipo bit de pastilha. As imagens capturadas foram realizadas por meio de um microscópio portátil, capaz de aproximar a imagem em até 1000x. Foram realizada uma foto antes e após de cada ensaios, para cada tipo de brocas, como podem ser observados nas Fig. 16 e 17 para uma broca do tipo borboleta, que mostra as arestas dos bits direito e esquerdo da mesma broca. As fotos foram feitas juntamente com uma régua de referência onde cada linha representa o espaçamento de 1 mm de distância.

Figura 16: Bit borboleta de 42 mm face 1 a) antes dos ensaios b) após os ensaios.



Fonte: Autor (2023).

Figura 17: Bit borboleta de 42 mm face 2 a) antes dos ensaios b) após os ensaios.



Fonte: Autor (2023).

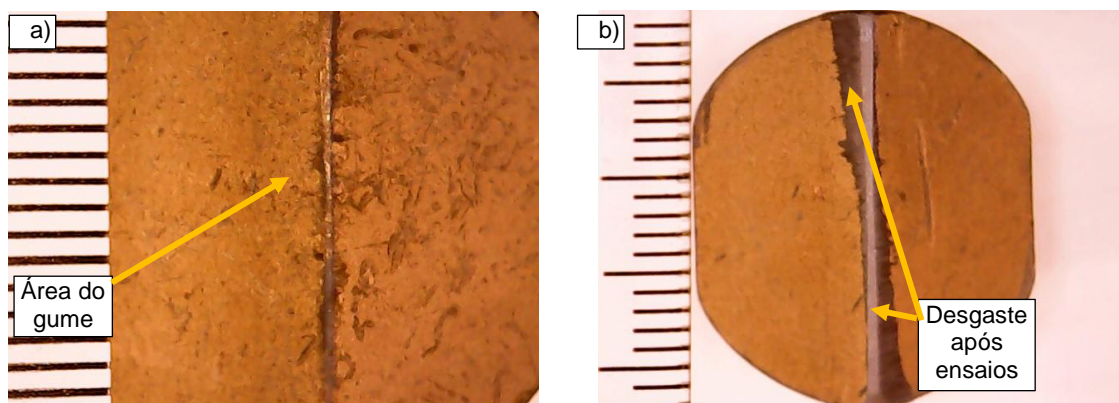
A broca do tipo borboleta de Φ 42 mm, que funcionou com a velocidade de rotação de 220 rpm, e foi submetido a todas as cargas, está apresentando maior desgaste, comparado às brocas do mesmo diâmetro e que foram testadas em outras velocidades de rotação. Outra comparação foi com as brocas borboleta de Φ 45 mm, que teve menor desgaste que as brocas de Φ 42 mm.

Na broca de Φ 42 da Fig. 16 e 17 a diferença na altura máxima entre os dois bits foi de 0,2 mm antes do ensaio.

Foi observado também que na maioria das brocas a ponta dos bits não tinha a mesma altura, por causa de isso, inicialmente se desgastava apenas de um lado. Nas brocas de Φ 45 mm a maior diferença de altura foi de 0,7 mm enquanto do Φ 42 mm a maior diferença deu 1,1 mm. Esta diferença de altura influencia no desempenho das brocas e no desgaste.

As imagens das brocas do tipo pastilha são analisadas na Fig. 18, apresentando a condição de antes e depois dos ensaios.

Figura 18: Bit de pastilha de 26 mm a) antes dos ensaios b) após os ensaios.



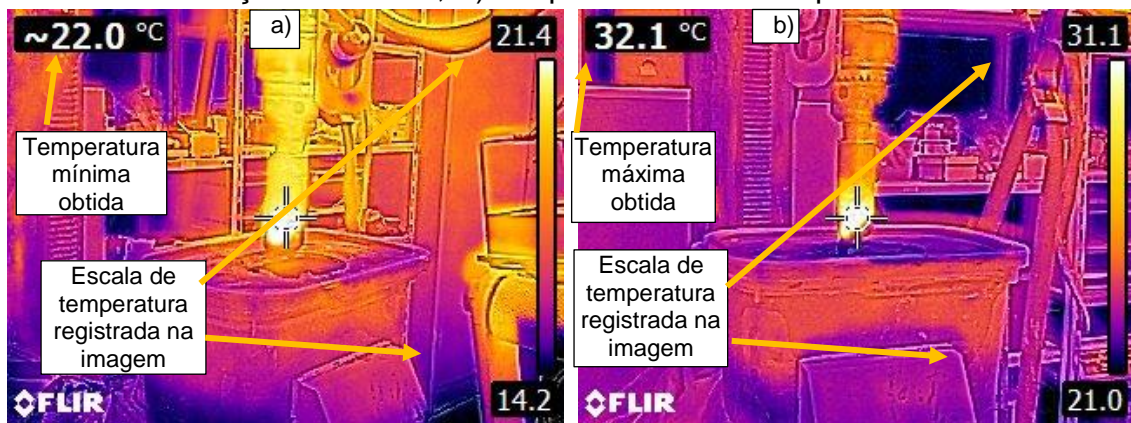
Fonte: Autor (2023).

Na Fig. 18 b se observa a perda do fio do gume na direção do giro, ficando plano a parte desgastada. Um método de avaliação do desgaste seria calculado a área da parte plana, já que não foi possível detectar a perda de massa por meio do monitoramento do peso com a balança de precisão.

Outro parâmetro que informa a possibilidade de desgaste, seria com o monitoramento da variação de temperatura, a que demonstraria o aquecimento das brocas durante os ensaios.

A maior variação ocorrida foi durante a furação, foi utilizando a broca tipo pastilha de 29 mm de diâmetro, com uma frequência de rotação de 440 rpm e utilizando a carga de 3 kg. Conforme a Fig. 19, ocorreu uma variação de 10,1 °C, na qual a temperatura inicial era de 22 °C antes da realização do ensaio e elevou até a temperatura de 32,1 °C após o ensaio.

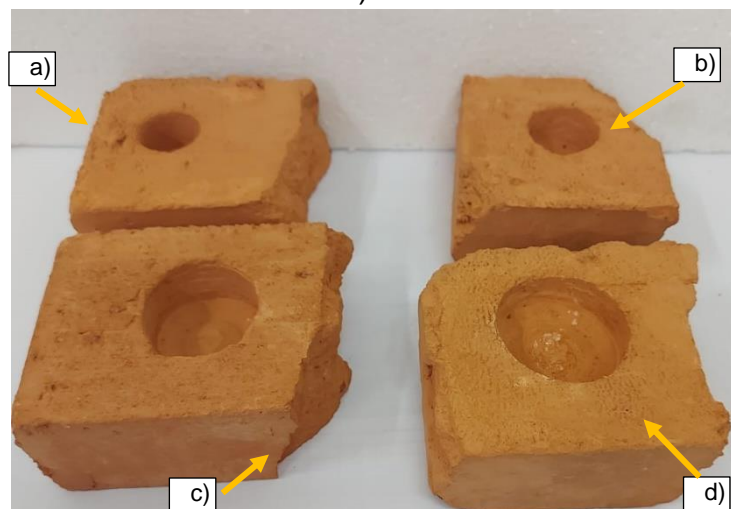
Figura 19: Imagens da câmera térmica A) temperatura mínimo antes da realização do ensaio, B) temperatura máximo após o ensaio.



Fonte: Autor (2023).

Foi realizado também o registro de imagens dos tijolos corpos de prova após os ensaios. A Fig. 20 apresenta um exemplo de cada diâmetro de perfuração das brocas, funcionando com uma carga e velocidade constante.

Figura 20: Corpos de prova após os ensaios A) bit de pastilha de 26 mm B) bit de pastilha de 29 mm C) bit borboleta de 42 mm D) bit borboleta de 45 mm.



Fonte: Autor (2023).

Para o monitoramento da perda de massa, as brocas foram pesadas antes e depois dos ensaios, para comparações de perda de massa. Foi utilizado uma balança de precisão de 3 casas decimais e carga máxima de 500 g. Após os ensaios, observou-se que não houve perda de massa relevante em nenhum dos corpos de prova, e em alguns casos a massa das brocas foi incrementada devido a penetração de resíduos do material do corpo de prova nas microfissuras do metal das brocas, por tanto, a análise do desgaste das brocas se realizou apenas com as imagens do gume das brocas.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa sobre análises do desempenho das brocas permitiu avaliar o comportamento das brocas usados nas atividades de perfuração. Quase não temos trabalhos acadêmicos voltados para a pesquisa de brocas de perfuração usadas nas atividades de extração de carvão. Estas brocas têm geometrias diferentes e não se conhece os parâmetros que influenciam de pressão e velocidade para ter as melhores atividades de operação.

Os resultados foram possíveis porque a bancada com seus instrumentos e sensores funcionaram com precisão e forneceram dados confiáveis para calcular as potências e rendimentos. As brocas usadas para a perfurar no teto são do tipo pastilha, comumente são usados de Φ 26 ou 29 mm, nos ensaios de perfuração com velocidade e carga constante seus rendimentos foram baixos entre 20 a 25% e o consumo mínimo de corrente elétrica foi de 0,82 A, incrementando-se em muitos casos com redução do rendimento para algumas carga e velocidades de rotação. As brocas usadas para fazer furos de explosivos, são do tipo borboleta, nos ensaios Φ 42 e de Φ 45 mm teve seu melhor rendimento e menor consumo de energia em 80 % e 33 % respectivamente, ambas com a carga de 5 kg e 440. Também se incrementa o consumo de corrente e se reduziu seu rendimento para outras cargas e outras velocidades.

Com esses resultados se espera contribuir com a atividade mineradora da região e aportar na melhor utilização das ferramentas e menor

consumo de energia, minimizando gastos e otimizando os recursos da empresa.

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo incentivo, ao professor Elvys Isaias Mercado Curi, aos colegas que me deram suporte durante o curso, e em especial à instituição de FAPESC N° 2019TR1058 pelo financiamento da pesquisa que contribui com o desenvolvimento desta região, e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, Diego dos Santos. **Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de furação através da variação de potência.** 2019.

BOEIRA, Angelo Marcos Gil, et al. **Modelagem e simulação das forças na furação com brocas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos.** 2012.

DE OLIVEIRA, Cássio Alves, et al. **Ensaio para Determinação do Rendimento em Motores de Indução Trifásicos: Acionamento, Operação e Monitoramento com Auxílio de Fonte Programável,** 2019.

DEWANGAN, Saurabh; CHATTOPADHYAYA, Somnath. **Critical analysis of wear mechanisms in cemented carbide.** Journal of materials engineering and performance, v. 24, n. 7, p. 2628-2636, 2015.

DIN 6580. **Begriffe der Zerspantechnik: Bewegungen und Geometrie des Zerspanvorganges.** Beuth Verlag GmbH, Berlin, Alemanha, 1985. 14 p.

Diniz Anselmo Eduardo, Marcondes Francisco Carlos, Lemos Nivaldo **Tecnologia da Usinagem dos Materiais,** by Artliber Editora Ltda 2014.

HOLMBERG, Kenneth et al. **Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry**. Tribology International, v. 115, p. 116-139, 2017.

JONES, H. G. et al. Examination of wear damage to rock-mining hardmetal drill bits. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 66, p. 1-10, 2017.

KATIYAR, Prvan Kumar et al. **Modes of failure of cemented tungsten carbide tool bits (WC/Co): A study of wear parts**. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 54, p. 27-38, 2016.

MELCONIAN, SARKIS. **Fundamentos de Elementos de Máquinas: Transmissões, Fixações e Amortecimento**. Saraiva Educação SA, 2019.

Norton, R. L. Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada. 4ª edição, 2013.

SOUZA, A. J.; MATTES, Fernando Borne; MOGNAGA, Gabriel Francisco. **Análise dos Esforços de Corte gerados na furação de ferro fundido DIN GGG50 para brocas de metal duro com diferentes microgeometrias**. In: *VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Uberlândia. 2014*