

Análise experimental do desgaste de brocas por meio do monitoramento da potência, da rotação e dos cavacos durante a furação

¹ Ana Luysa Cavaleiro Azeredo  ² Mateus Augusto Mendes Figueiredo  ¹ Luiz Rafael Resende da Silva  

¹ Instituto Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus, São Mateus, ES, Brasil² Instituto Federal do Espírito Santo, Campos Vitória, Vitória, ES, Brasil

RESUMO

A furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na fabricação mecânica, sendo o desgaste da broca um fator que influencia diretamente a qualidade do furo e a eficiência do processo. Este trabalho teve como objetivo analisar a influência da potência consumida, da rotação da furadeira e da formação dos cavacos na evolução do desgaste de uma broca helicoidal durante a furação de um corpo de prova de aço 1020. A metodologia consistiu na realização de três furos consecutivos utilizando a mesma broca de aço rápido (HSS), monitorando-se a potência elétrica, a rotação e o tempo de usinagem. Após cada ensaio, foram realizadas análises visuais da ferramenta e dos cavacos para identificar mecanismos de desgaste e alterações térmicas. Os resultados mostraram que a redução da rotação foi acompanhada pelo aumento da potência consumida, indicando maior resistência ao corte. Também foram observados desgastes de flanco, formação de arestas postiças e alterações na coloração da broca e dos cavacos. Conclui-se que o monitoramento dessas variáveis auxilia na avaliação do desempenho da furação e na otimização das condições de usinagem.

Palavras-chave:

Furação. Desgaste de ferramenta. Potência elétrica. Rotação. Cavaco.

Experimental analysis of drill wear through the monitoring of power consumption, rotational speed, and chip formation during drilling.

ABSTRACT

Drilling is one of the most widely used machining processes in mechanical manufacturing, and drill wear is a key factor affecting hole quality and process efficiency. This study aimed to analyze the influence of power consumption, drill rotational speed, and chip formation on the wear progression of a twist drill during the drilling of an 1020 steel specimen. The methodology consisted of performing three consecutive drilling operations using the same high-speed steel (HSS) drill while monitoring electrical power consumption, rotational speed, and machining time. After each test, visual analyses of the drill and the generated chips were conducted to identify wear mechanisms and thermal effects. The results showed that the reduction in rotational speed was accompanied by an increase in power consumption, indicating higher cutting resistance. Flank wear, built-up edge formation, and color changes in both the drill and the chips were also observed. It was concluded that monitoring these variables is an effective approach for evaluating drilling performance and optimizing machining conditions.

Keywords:

Drilling. Tool wear. Electrical power consumption. Rotational speed. Chip.

Análisis experimental del desgaste de brocas mediante el monitoreo de la potencia, la rotación y las virutas durante el taladrado.

RESUMEN

La perforación es uno de los procesos de mecanizado más utilizados en la fabricación mecánica, siendo el desgaste de la broca un factor que influye directamente en la calidad del orificio y en la eficiencia del proceso. Este estudio tuvo como objetivo analizar la influencia del consumo de potencia, de la velocidad de rotación de la taladradora y de la formación de virutas en la evolución del desgaste de una broca helicoidal durante la perforación de una probeta de acero 1020. La metodología consistió en realizar tres perforaciones consecutivas utilizando la misma broca de acero rápido (HSS), monitoreando el consumo de potencia eléctrica, la velocidad de rotación y el tiempo de mecanizado. Después de cada ensayo, se realizaron análisis visuales de la herramienta y de las virutas para identificar los mecanismos de desgaste y los efectos térmicos. Los resultados mostraron que la disminución de la velocidad de rotación estuvo acompañada por un aumento del consumo de potencia, lo que indicó una mayor resistencia al corte. También se observaron desgaste de flanco, formación de filo recreado y cambios de color tanto en la broca como en las virutas. Se concluye que el monitoreo de estas variables constituye una herramienta eficaz para evaluar el desempeño del proceso de perforación y optimizar las condiciones de mecanizado.

Palabras clave:

Perforación. Desgaste de herramienta. Consumo de potencia eléctrica. Velocidad de rotación. Viruta.

1 INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação transformam matérias-primas em produtos acabados ou semiacabados. Dentre eles, a usinagem destaca-se pela remoção controlada de material para a obtenção de geometrias específicas, sendo a furação uma de suas operações mais difundidas devido à necessidade de furos para montagem, fixação ou passagem de fluidos (Groover, 2017).

Segundo a norma DIN 8580, a furação é um processo de usinagem por remoção de material destinado à obtenção ou modificação de superfícies cilíndricas internas, geradas de forma coaxial ao eixo de rotação do movimento de corte. Essa operação consolida-se como uma das mais empregadas na fabricação mecânica, uma vez que os furos desempenham funções fundamentais em componentes e conjuntos. Suas aplicações englobam desde a fixação, posicionamento e orientação de peças até a redução de massa e a passagem de fluidos lubrificantes (Rebeyka, 2016).

A furadeira é a máquina-ferramenta padrão para esse processo, destacando-se os modelos de coluna e de bancada, sendo constituída essencialmente por base, coluna, mesa de apoio e cabeçote de rotação. Sua ampla aplicação em indústrias e laboratórios se deve à simplicidade operacional e à versatilidade na furação de diversos materiais (Groover, 2017).

A ferramenta empregada no processo é a broca, que combina movimentos simultâneos de rotação, para o corte, e de avanço axial, para a penetração na peça (Secco; Amaral Filho; Oliveira, 2000). Dentre os modelos existentes, as brocas helicoidais são as mais utilizadas na indústria por sua versatilidade e eficiência no escoamento de cavacos através de seus canais.

As brocas helicoidais dividem-se em três regiões principais: a haste (cilíndrica ou cônica), utilizada para a fixação na máquina; o corpo, parte útil que contém os canais para o escoamento de cavacos e fluido; e a ponta, zona de corte que integra as arestas principais e o ângulo de ponta, cuja geometria varia conforme o material usinado (Secco; Amaral Filho; Oliveira, 2000).

Apesar de ser considerada uma operação relativamente simples, a furação envolve elevadas solicitações mecânicas e térmicas que influenciam diretamente a qualidade do furo produzido e a vida útil da ferramenta. Variáveis como velocidade de corte, avanço, potência disponível na máquina, propriedades do material usinado e geometria da broca afetam significativamente o desempenho do processo e os mecanismos de desgaste da ferramenta (Sandvik Coromant, [s.d.]).

Em uma análise probabilística do desgaste de brocas helicoidais, Patiño *et al.* (2005) demonstraram que o aumento do desgaste de flanco está associado à elevação da probabilidade de falha da ferramenta. Quando ocorre a falha, a ferramenta deve ser substituída ou reparada para garantir a precisão necessária ao processo, podendo resultar na perda de produtividade. Dessa maneira, o acompanhamento das condições da ferramenta ajuda na identificação das alterações em seu desempenho e na evolução do desgaste.

Estudos sobre o desgaste de ferramentas também permitem avaliar sua vida útil e comparar o desempenho de brocas sob diferentes condições de operação. Marques *et al.* (2015) investigaram o desgaste de brocas de aço rápido (HSS), revestidas e não revestidas, durante a furação de ferro fundido nodular DIN GGG 50. Os autores observaram que as condições de corte, particularmente o avanço, influenciam o desgaste de flanco da ferramenta, sendo identificadas também situações de falha catastrófica. Esses resultados reforçam a importância do acompanhamento das condições de operação para avaliar a evolução do desgaste e o desempenho da broca.

Para esse acompanhamento, podem ser monitoradas variáveis relacionadas às condições de operação da máquina e aos esforços envolvidos no processo. Dentre elas, destacam-se a rotação e a potência consumida, que podem ser determinadas por meio de instrumentos de medição, como o tacômetro e o alicate amperímetro. Segundo Thomazini e Albuquerque (2020), o alicate amperímetro é um equipamento transformador de corrente de núcleo dividido. Nesse sistema, o condutor energizado atua como enrolamento primário e o núcleo móvel do instrumento envolve o condutor para realizar a medição. A utilização de alicates amperímetros facilita a leitura de parâmetros elétricos, como tensão, potência e corrente.

De maneira similar, o tacômetro é um instrumento utilizado para mensurar o número de ciclos de um equipamento por minutos. O tacômetro digital permite estabelecer o torque do equipamento, através da medição da rotação, que é transmitida para o corpo de prova. A Equação 1 demonstra a relação da potência (P) em Watts e da rotação (n) em rpm para a determinação do torque (T).

$$T = \frac{30 * P}{\pi * n} = \frac{[Watt]}{[RPM]} = [N\ m] \quad (1)$$

Por meio do torque, é possível estimar a força de corte através da relação entre o momento torsor e o raio efetivo de atuação da ferramenta, expressa pela Equação 2, na qual corresponde ao raio, em metros, que determina o braço de alavanca associado ao diâmetro da broca e T o torque do equipamento. Dessa forma, a análise da potência permite inferir as variações da força de corte durante o processo de furação, correlacionando, assim, o comportamento energético com os esforços mecânicos presentes no sistema.

$$Força\ de\ Corte = \frac{T}{r} = \frac{[N * m]}{[m]} \quad (2)$$

O processo de furação possui outras variáveis que influenciam no estado final da ferramenta, da peça e do cavaco produzido, dentre elas, o tempo de corte (t), que é o tempo total entre o início e o fim da perfuração, possibilitando a determinação da velocidade de corte. Considerando a profundidade usinada (P_c) e o tempo associado à operação, a velocidade de corte (V_f) é calculada utilizando a Equação 3, presente nas teorias cinemáticas.

$$V_f = \frac{P_c}{t} = \frac{[m]}{[s]} \quad (3)$$

Durante o ensaio de furação, constatou-se que a potência consumida pelo motor sofre uma série de degradações energéticas antes de se converter efetivamente em potência de corte na ponta da broca. Embora o levantamento quantitativo detalhado dessas variáveis não tenha sido o escopo deste estudo, é fundamental reconhecer sua interferência direta nos resultados finais, justificada pela divergência entre a potência de entrada e a potência útil.

Esse fenômeno decorre das perdas eletromecânicas inerentes ao motor elétrico, que incluem perdas resistivas nos enrolamentos devido ao Efeito Joule, perdas magnéticas no núcleo e perdas mecânicas associadas aos atritos internos. Além disso, há perdas decorrentes da transmissão mecânica da máquina-ferramenta, resultantes do atrito e da flexão das correias de transmissão, do atrito nos mancais do eixo-árvore e das dissipações de energia nos elementos de fixação da ferramenta, especialmente no mandril. Em conjunto, essas perdas reduzem a eficiência na conversão da potência elétrica em potência mecânica efetivamente disponível para o processo de usinagem (Wójcicki; Bianchi, 2018).

O avanço do desgaste da ferramenta e a formação de aresta postiça de corte podem dificultar a evacuação dos cavacos, material removido durante a usinagem, elevando a temperatura durante o processo.

Esse aumento térmico favorece a oxidação superficial do material removido, resultando em alterações de coloração que podem ser associadas a diferentes níveis de aquecimento. Dessa forma, a análise visual dos cavacos constitui uma ferramenta complementar para a avaliação das condições de corte, do desgaste da ferramenta e da dissipação de calor durante a usinagem (Secco *et al.*, 2019).

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da rotação e da potência de uma furadeira de bancada durante a furação de barras de aço 1020, utilizando uma única broca ao longo de todo o experimento. Além da avaliação das diferentes condições operacionais empregadas, busca-se investigar a progressão do desgaste superficial da ferramenta em função dos parâmetros de usinagem adotados.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais

Os ensaios experimentais foram realizados na oficina de usinagem do *campus* São Mateus - ES, utilizando uma furadeira de bancada com potência nominal de 0,37 kW e rotação máxima de 1690 rpm. Como material de trabalho, foi empregado um corpo de prova cilíndrico de aço 1020 e diâmetro de 31,7mm.

A operação de furação foi executada com uma broca helicoidal da marca IRWIN, fabricada em aço rápido (HSS), conforme a norma DIN 338 RN. A ferramenta possuía diâmetro de 12,0 mm, comprimento útil de 101 mm e comprimento total de 151 mm. A fixação da broca ao eixo da máquina foi realizada por meio de um mandril.

Adicionalmente, empregou-se um tacômetro digital para a medição da rotação efetiva do mandril da máquina. Durante a execução de cada furo, os valores indicados pelo alicate amperímetro e pelo tacômetro, bem como o tempo de usinagem, foram registrados por meio de filmagens, conforme a Figura 1. Para o monitoramento dos parâmetros operacionais, foi utilizado um alicate amperímetro conectado à alimentação elétrica da furadeira, permitindo a medição da corrente consumida durante o processo de furação.

Figura 1 - Imagem demonstrativa da coleta de dados.



Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

2.2 Métodos

Antes da realização dos ensaios, foram realizadas as fotografias do estado inicial da broca, para serem utilizadas como referência, e confeccionados furos-guia de pequena profundidade na superfície do corpo de prova. Essa etapa teve como finalidade facilitar o posicionamento inicial da broca, minimizando desvios durante sua penetração no material e aumentando a repetibilidade dos ensaios.

O procedimento experimental consistiu na execução de três furos consecutivos em um corpo de prova de aço 1020, empregando a mesma broca helicoidal durante todo o experimento. Com um alicate amperímetro conectado ao sistema cabeado à rede de energia na qual a furadeira estava ligada, foram realizadas as medições da tensão de alimentação e da corrente em uma das fases da furadeira. A partir desses dados, foi possível determinar a potência aparente e o fator de potência do equipamento.

As rotações da broca foram medidas por meio de um tacômetro digital, cujo feixe de *laser* foi direcionado ao mandril da furadeira. A partir dos valores de potência e rotação, foi determinado o torque transmitido à ferramenta por meio da Equação 1. A velocidade de avanço foi calculada através da Equação 3.

Após cada ensaio, foram geradas imagens da broca para avaliação qualitativa da evolução do desgaste da ferramenta. Nessa análise, foram observadas alterações de coloração decorrentes do aquecimento, desgaste de flanco, formação de aresta postiça de corte e aderência de material proveniente da peça usinada.

Paralelamente, realizou-se a análise visual dos cavacos gerados, considerando aspectos como forma, continuidade e coloração. Por fim, os dados coletados foram organizados em tabelas e gráficos, permitindo correlacionar os parâmetros operacionais da máquina com o desempenho da furação e com a evolução do desgaste da ferramenta ao longo dos ensaios.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Grandezas do processo

As velocidades de avanço calculadas por meio da Equação 3 para os três ensaios foram de 7,61 mm/min, 12,43 mm/min e 10,06 mm/min para os testes 1, 2 e 3, respectivamente. Conforme apresentado na Tabela 1, o segundo ensaio apresentou a maior velocidade de avanço, enquanto o primeiro apresentou o menor valor. Essas diferenças estão associadas às variações operacionais inerentes ao avanço manual da ferramenta durante a furação.

No primeiro ensaio, a rotação da furadeira apresentou variação entre 930 e 963 rpm, enquanto a potência consumida permaneceu entre 377 e 422 W. Esse comportamento indica uma variação da resistência ao corte durante o avanço da broca no material, exigindo diferentes níveis de esforço do motor. A variação da rotação e da potência também pode estar relacionada à influência do desgaste da ferramenta. Patiño *et al.* (2005) observaram que a progressão do desgaste de flanco está associada ao aumento da probabilidade de falha de brocas helicoidais.

No segundo ensaio, foram observadas rotações entre 900 e 950 rpm e potências entre 445 e 530 W. A combinação entre os valores de rotação e potência indica maior solicitação do motor durante a operação, possivelmente associada ao aumento dos esforços de corte. Esse comportamento pode também estar relacionado ao desgaste progressivo da ferramenta decorrente da utilização da mesma broca nos ensaios consecutivos. Esse resultado se aproxima das conclusões de Marques *et al.* (2015), que evidenciaram a influência das condições de corte sobre o desgaste de brocas HSS.

No terceiro ensaio, a rotação variou entre 880 e 938 rpm, enquanto a potência permaneceu entre 372 e 414 W. Observou-se que os maiores valores de potência ocorreram em condições de menor rotação, indicando maior carga imposta ao motor durante a operação. De modo geral, as variações observadas nos três ensaios podem estar relacionadas ao avanço manual da ferramenta, às condições de contato entre a broca e o material e ao possível desgaste acumulado da ferramenta ao longo dos ensaios.

Tabela 1 – Resultados obtidos por meio do ensaio de furação.

Ensaio	Velocidade de avanço [mm/min]	Faixa de rotação [RPM]	Faixa de potência [W]
1	7,61	930 – 963	377 – 422
2	12,43	900 – 950	445 – 530
3	10,06	880 – 938	372 – 414

Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

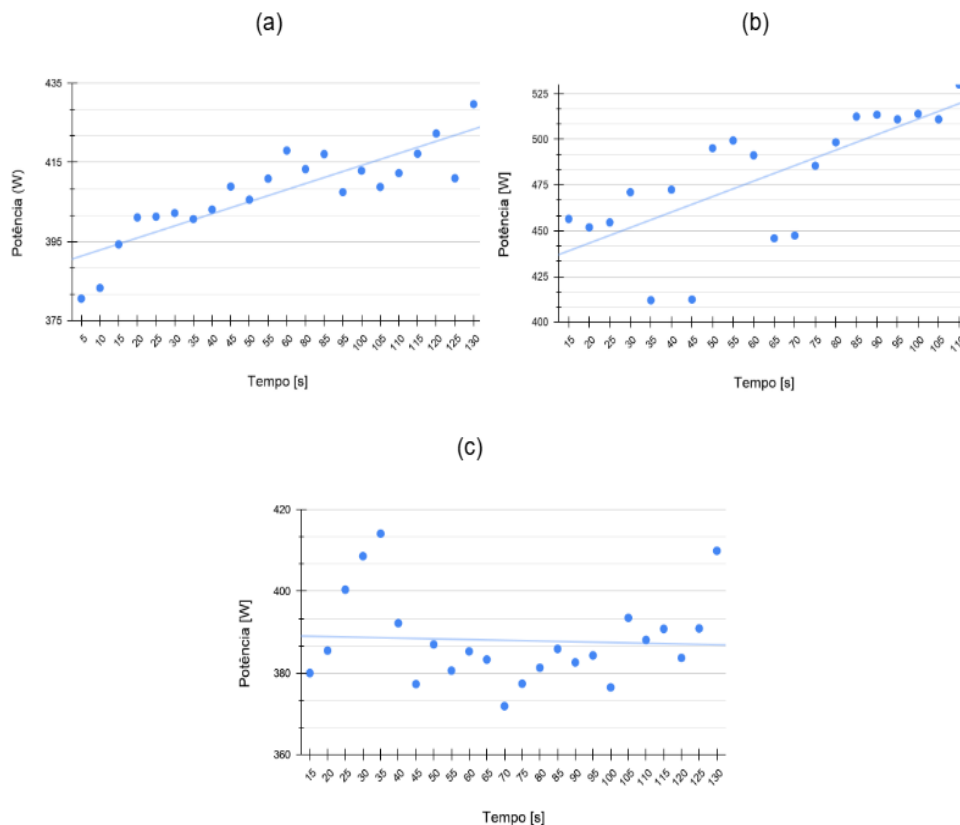
O primeiro ensaio apresentou uma tendência geral de aumento da potência ao longo do tempo, acompanhada por oscilações entre as medições, conforme mostrado na Figura 2(a). Esse comportamento indica um aumento progressivo da demanda do motor durante a furação, possivelmente relacionado às condições de corte, à medida que a broca avançava no material.

De maneira similar, o segundo ensaio, apresentado na Figura 2(b), apresentou tendência igual de crescimento da potência, com maior dispersão dos valores no início da operação. Ao longo do processo, os valores apresentaram comportamento predominantemente crescente, indicando aumento da solicitação do motor durante a furação.

Por fim, no terceiro ensaio, não foi identificada uma tendência significativa de aumento da potência (ao longo do tempo, conforme mostrado na Figura 2(c)). Os valores permaneceram distribuídos em uma faixa

relativamente constante, com oscilações e alguns picos pontuais, caracterizando um comportamento mais estável durante a operação.

Figura 2 - Potência [W] x Tempo [s] obtidos nos testes.



Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

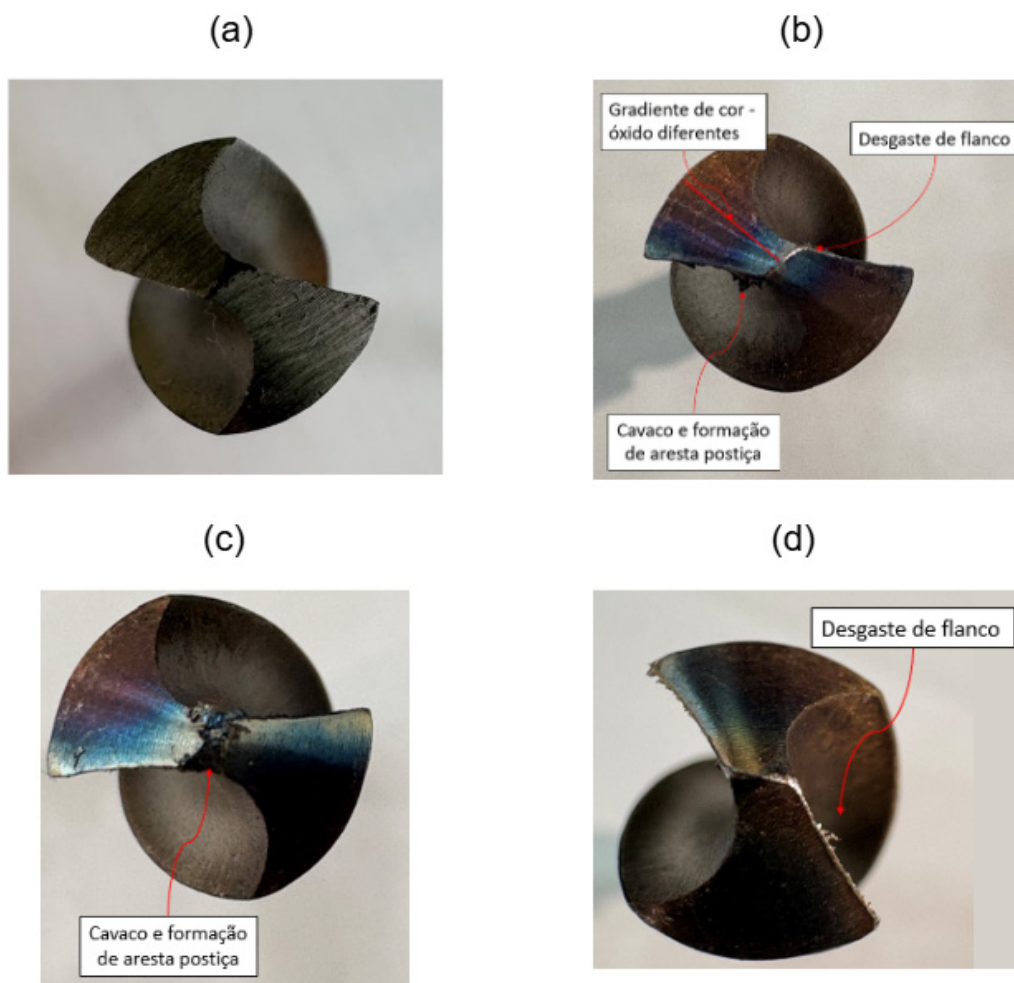
A análise conjunta dos resultados sugere que o aumento da potência consumida está diretamente relacionado ao acréscimo da resistência ao corte e dos esforços de usinagem. Esse comportamento pode ser utilizado como parâmetro de monitoramento das condições de operação, permitindo a identificação das variações energéticas associadas à mudança no desempenho da broca.

3.2 Desgaste da ferramenta

A Figura 3(a) ilustra a broca nova utilizada no processo de furação, enquanto as Figuras 3(b), 3(c) e 3(d) apresentam o desgaste térmico sofrido pela broca durante o primeiro processo de furação. Como indicado, observa-se uma região com nítida alteração do gradiente de coloração decorrente da oxidação decorrente do superaquecimento gerado na operação. Esse fenômeno provoca a perda de dureza do material, culminando na redução da vida útil da ferramenta.

Observou-se também que, durante o primeiro processo, já se pode observar a formação de cavacos e arestas postizas na aresta de corte da broca, caracterizada pela adesão do material à superfície da ferramenta. Com as elevadas temperaturas e a pressão na zona de contato, ocorrem a plastificação e a subsequente soldagem por difusão do material, comprometendo a precisão dimensional e o acabamento.

Figura 3 - Vistas superiores da broca utilizada durante o processo de furação (a) broca nova; (b) após a primeira furação; (c) após a segunda furação; e (d) após a terceira furação.

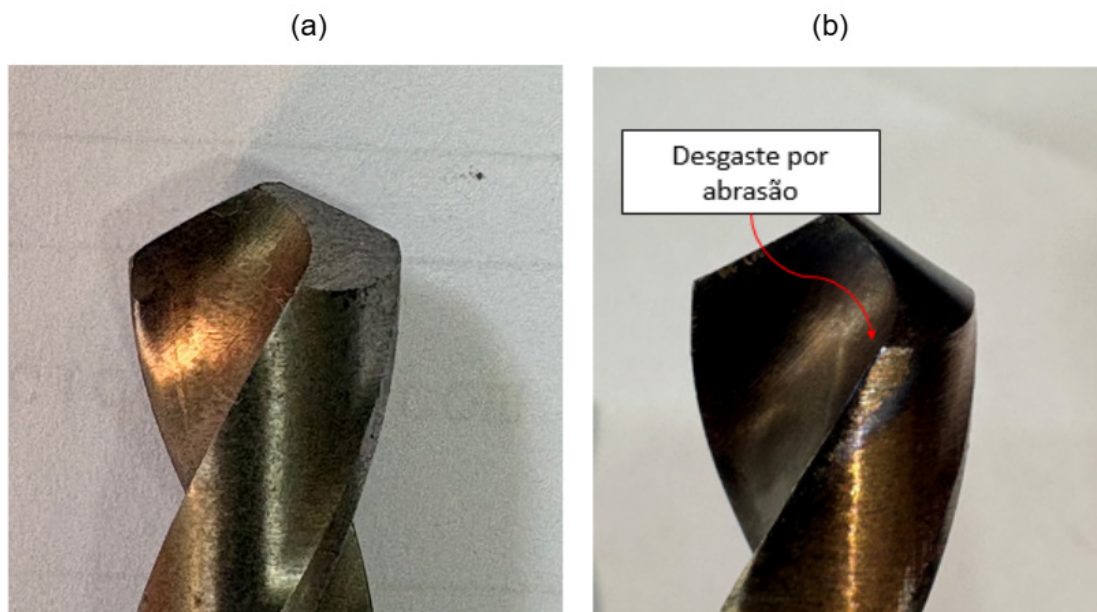


Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

A Figura 4 evidencia que os fenômenos citados anteriormente não se limitam à extremidade frontal, mas estendem-se por outras regiões da ferramenta. Observa-se que a variação de coloração se propaga ao longo do corpo da broca, exibindo uma tonalidade significativamente mais clara do que a identificada na ponta. Adicionalmente, nota-se que a formação de aresta postiça não ocorre apenas na aresta principal de corte. O fenômeno também se manifesta no interior dos canais de escoamento, embora com menor intensidade.

Na Figura 4, observa-se que, após sucessivos ciclos de furação, iniciou-se o surgimento de ranhuras na superfície lateral da broca, caracterizando o desgaste por abrasão sofrido pela ferramenta. Além disso, a região indicada exibe uma alteração de tonalidade, o que evidencia a severidade das solicitações térmicas e mecânicas atuantes no processo.

Figura 4 - Vista lateral da broca utilizada durante o processo de furação (a) broca nova; (b) após a última furação.



Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

3.3 Análise visual dos cavacos

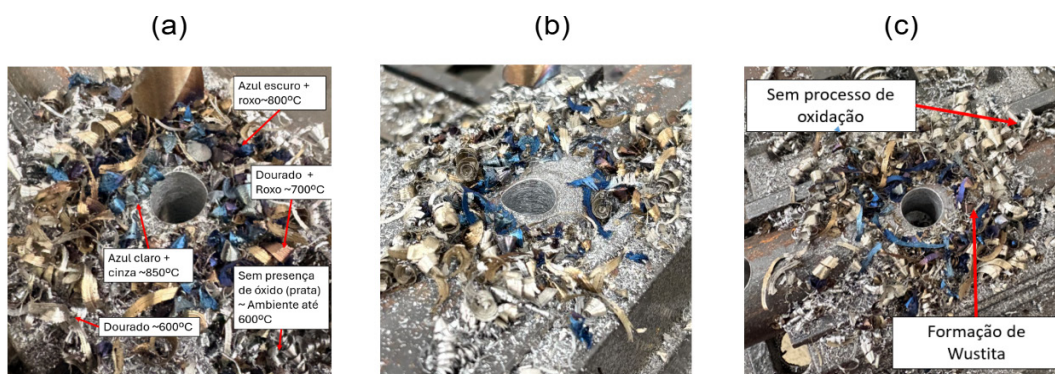
Ao final de cada ensaio de furação, os cavacos gerados foram mantidos próximos ao corpo de prova de forma a preservar a sequência de formação durante o processo. Dessa maneira, os cavacos mais distantes do furo correspondem ao estágio inicial da usinagem, enquanto os mais próximos representam os últimos instantes de corte. Essa disposição permite analisar a evolução das condições de usinagem ao longo da operação.

A variação de coloração observada nos cavacos pode ser associada às mudanças de temperatura ocorridas na zona de corte. Conforme discutido por Secco *et al.* (2019), cavacos com coloração prateada indicam baixa ou nenhuma formação de óxidos superficiais, enquanto tonalidades douradas estão associadas ao aumento da temperatura e da oxidação. Já as colorações azuladas e arroxeadas, são indicativas de temperaturas ainda mais elevadas, decorrentes da formação de diferentes tipos e espessuras de óxidos na superfície do material removido.

A Figura 5 apresenta a evolução da coloração dos cavacos obtidos nos três ensaios de furação. Nos cavacos provenientes do primeiro furo, Figura 5(a), observou-se predominância de tonalidades mais claras, indicando condições térmicas menos severas. No segundo ensaio, mostrado na Figura 5(b), verificou-se uma maior ocorrência de regiões douradas e azuladas, sugerindo elevação da temperatura durante a usinagem.

No terceiro ensaio (Figura 5(c)), os cavacos mais próximos ao furo apresentaram tonalidade azul escura mais intensa, quando comparadas às observadas nos ensaios anteriores. Esse comportamento sugere temperaturas mais elevadas na região de corte, possivelmente associadas ao desgaste progressivo da broca e à consequente perda de eficiência no processo de remoção de material. Esse resultado é corroborado pelo fato de que o terceiro furo não pôde ser concluído devido ao travamento da ferramenta no corpo de prova, indicando comprometimento da capacidade de corte e aumento significativo dos esforços de usinagem.

Figura 5 - Colorações características dos cavacos provenientes do processo de usinagem.



Fonte: Elaborado pelos autores, (2026).

Após a realização de todas as furações, observou-se que houve uma grande variação no gradiente de coloração dos cavacos e também nos tipos de cavacos gerados durante o processo de furação. Essa variação de cor decorre da formação de diferentes tipos e espessuras de óxido de ferro nos cavacos, ligada à temperatura de corte, revelando a variação térmica.

De acordo com o estudo de Secco *et al.* (2019), a transição das cores dos cavacos é reflexo direto dos tipos e das espessuras das camadas de óxido de ferro geradas pelo calor do processo. A região de cavacos prata indica que não ocorreu o processo de oxidação, mostrando que o calor gerado na região não foi suficiente para ativar a difusão iônica do material. Na região em que se observam as cores dourada, azul e roxa, pode-se dizer que há a combinação dos óxidos wustita (FeO) e magnetita (Fe_3O_4).

A wustita possui uma coloração naturalmente azul, é termicamente instável abaixo de 570°C , conforme apontam Secco *et al.* (2019). Com isso, a presença de nuances azuis, roxas ou douradas confirma que a temperatura daquela zona do cavaco ultrapassou os 570°C durante o processo de furação. Por último, temos os cavacos de coloração cinza, provenientes da região que sofreu superaquecimento, na qual podem ocorrer temperaturas na faixa de 900°C a 950°C , caracterizando a queima e a consolidação final das camadas de óxido na superfície.

4 CONCLUSÕES

O desenvolvimento da prática permitiu analisar a influência dos parâmetros operacionais no processo de furação de um corpo de prova de aço 1020, evidenciando a relação entre a potência consumida, a rotação da ferramenta e os esforços de corte. De modo geral, observou-se que a redução da rotação foi acompanhada pelo aumento da potência requerida, indicando maior resistência ao corte durante a usinagem e confirmando a influência das condições operacionais no desempenho do processo.

Como consequência do aumento dos esforços de usinagem, foi possível acompanhar a evolução do desgaste da broca ao longo dos ensaios. As análises evidenciaram alterações de coloração, desgaste de flanco, formação de aresta postiça de corte e aderência de material, mecanismos que reduziram progressivamente a eficiência da ferramenta e comprometem sua capacidade de corte.

Essas observações foram comprovadas pela análise visual dos cavacos, cuja variação de coloração indicou o aumento da temperatura na zona de corte. A predominância de tonalidades azuladas e arroxeadas, especialmente no terceiro ensaio, evidenciou solicitações térmicas e mecânicas mais severas, que geraram o travamento da broca antes da conclusão da última furação.

Dessa forma, os resultados experimentais mostraram-se coerentes com os conceitos teóricos abordados sobre o processo de furação, permitindo compreender a influência dos parâmetros de usinagem no consumo de potência, no desgaste da ferramenta e na formação dos cavacos. Assim, a prática demonstrou a importância do monitoramento dessas variáveis para a avaliação do desempenho do processo e para a otimização das condições de usinagem.

Uso de Inteligência Artificial: A ferramenta ChatGPT (OpenAI) foi utilizada exclusivamente para apoio à revisão linguística, tradução e aprimoramento da redação do manuscrito. Os autores são integralmente responsáveis pelo conteúdo científico apresentado.

REFERÊNCIAS

- DIN. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung**. Berlin: DIN, 2003.
- GROOVER, Mikell P. **Fundamentos da manufatura moderna: materiais, processos e sistemas**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- MARQUES, Fernando Michelon; ROCHA, Alexandre da Silva; CAVALER, Luiz Carlos de Cesaro; CURI, Elvys Isaías Mercado. Caracterização de desgaste de brocas de HSS revestidas com AlCrN e não revestidas, em ensaios de furação, na usinagem de ferro fundido nodular DIN GGG 50. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, v. 19, n. 1, p. 87-104, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5944/ribim.19.1.42436>.
- PATÍÑO RODRÍGUEZ, Carmen Elena; MARCICANO, João Paulo Pereira; SOUZA, Gilberto Francisco Martha de. Análise probabilística do desgaste de brocas helicoidais. In: **Congresso brasileiro de engenharia de fabricação**, 3, 2005, Joinville. Anais [...]. Rio de Janeiro: ABCM, 2005.
- REBEYKA, Cláudio José. **Processos mecânicos de usinagem**. Curitiba: InterSaberes. 2016.
- SANDVIK COROMANT. **Usinagem de um furo**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/drilling>. Acesso em: 6 ago. 2026.
- SECCO, Daniel de Carvalho; RODRIGUES, Alessandro Roger; JASINEVICIUS, Renato Goulart; PIZANI, Paulo Sérgio. Relação entre oxidação do cavaco e temperatura de corte no fresamento de aços para moldes e matrizes. In: **Congresso brasileiro de engenharia de fabricação**, 10., 2019, São Carlos. Anais [...]. São Carlos: ABCM, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEP2019.COF2019-0521>.
- SECCO, Hamilton Roberto Machado; AMARAL FILHO, Sérgio Lisboa do; OLIVEIRA, José Francisco Gomes de. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. São Carlos: EESC/USP. 2000.
- THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga de. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 8. ed. São Paulo: Érica. 2020.
- WÓJCICKI, Jeremi; BIANCHI, Giacomo. Electric load management in spindle run-up and run-down for multi-spindle machine tools via optimal power-torque trajectories and peak load synchronization. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5-8, p. 1819-1835, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1341-7>.