



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALINE CELIANE GARCIA DE SOUSA

**ANÁLISE DE DESGASTES EM BROCAS HELICOIDAIS DE AÇO RÁPIDO (HSS)
TRATADAS COM CONDICIONADOR DE METAIS.**

CARAÚBAS

2025

ALINE CELIANE GARCIA DE SOUSA

**ANÁLISE DE DESGASTES EM BROCAS HELICOIDAIS DE AÇO RÁPIDO (HSS)
TRATADAS COM CONDICIONADOR DE METAIS.**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Wendell Albano

CARAÚBAS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

SAa Sousa, Aline Celiane Gacia de .
 Análise de desgastes em brocas helicoidais de
 aço rápido tratadas com condicionador de metais /
 Aline Celiane Gacia de Sousa. - 2025.
 49 f. : il.

 Orientadora: Wendell Albano.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
 Mecânica, 2025.

 1. Aço-rápido. 2. furação. 3. condicionador de
 metais. 4. usinagem a seco. I. Albano, Wendell,
 orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ALINE CELIANE GARCIA DE SOUSA

**ANÁLISE DE DESGASTES EM BROCAS HELICOIDAIS DE AÇO RÁPIDO (HSS)
TRATADAS COM CONDICIONADOR DE METAIS.**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 29 / 07/ 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **WENDELL ALBANO**
Data: 05/08/2025 07:36:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wendell Albano (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **ADIANA NASCIMENTO SILVA**
Data: 05/08/2025 17:02:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adiana Nascimento Silva (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **ANA CLAUDIA DE MELO CALDAS BATISTA**
Data: 06/08/2025 12:07:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ana Claudia de Melo Caldas Batista (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a Virgem Maria e a Santa Rita, que me mantiveram de pé. Agradeço a minha família, por todo apoio. Agradeço a todos os meus amigos, que sabem que são importantes pra mim, por todo o cuidado, conversas e sorrisos que compartilhamos. Agradeço, principalmente, a Dalvino que não me deixou desistir e que continua me dando força.

RESUMO

O aço-rápido, conhecido como High-Speed Steel (HSS), é um dos materiais mais comuns na fabricação de ferramentas de usinagem. Apesar de apresentar boas propriedades como material de ferramentas, o uso do aço rápido na usinagem limita as velocidades de corte a apenas 35 m/min, o que é significativamente mais baixo em comparação com outros materiais, como o metal duro. No entanto, muitas aplicações como a furação, ainda dependem do aço rápido como principal material. Tradicionalmente é utilizada a lubrificação por jorro, fluxo abundante contínuo, na furação, onde um grande volume de fluido é utilizado para diminuir a temperatura na região do corte. O uso de fluidos de corte tem parcela considerável nos danos ambientais e na saúde dos operários do ramo da usinagem. Isso tem impulsionado a busca por soluções que atendam às exigências ambientais, governamentais e empresariais de forma prática. Nesse cenário, o desenvolvimento de novos aditivos e condicionadores surge como uma alternativa promissora, com potencial para reduzir o atrito entre superfícies metálicas em contato e atender às demandas por processos mais limpos e eficientes. Este trabalho propõe uma técnica de tratamento em brocas helicoidais para reduzir a necessidade de lubrificantes. As brocas são imersas em um condicionador de metais e aquecidas a 80°C para promover a adsorção do fluido em suas superfícies. Brocas tratadas e não tratadas foram testadas em furação a seco, com critérios de fim de ensaio baseados no desgaste severo ou na execução de 40 furos. Ao longo dos ensaios também foram medidas as temperaturas das brocas tratadas e não tratadas a fim de fazer-se um comparativo entre elas. Os resultados demonstram um aumento na vida útil das ferramentas tratadas com o condicionador, indicando o potencial dessa técnica para processos de usinagem mais limpos e eficientes.

Palavras-chave: aço-rápido, furação, condicionador de metais, usinagem a seco.

ABSTRAC

High-speed steel (HSS) is one of the most common materials used in the manufacturing of machining tools. Despite having good properties as a tool material, its use in machining limits cutting speeds to just 35 m/min, which is significantly lower compared to other materials like cemented carbide. However, many applications, such as drilling, still rely on high-speed steel as the primary material. Traditionally, flood lubrication is used in drilling, where a large volume of fluid is continuously applied to reduce the temperature in the cutting zone. The use of cutting fluids contributes significantly to environmental damage and poses health risks to workers in the machining industry. This has driven the search for practical solutions that meet environmental, governmental, and corporate demands. In this context, the development of new additives and conditioners emerges as a promising alternative with the potential to reduce friction between contacting metallic surfaces and meet the demand for cleaner, more efficient processes. This work proposes a treatment technique for twist drills to reduce the need for lubricants. The drills are immersed in a metal conditioner and heated to 80°C to promote the adsorption of the fluid onto their surfaces. Both treated and untreated drills were tested in dry drilling, with the end-of-test criteria based on severe wear or the completion of 40 holes. Throughout the tests, the temperatures of the treated and untreated drills were also measured to make a comparison between them. The results show an increase in the lifespan of the tools treated with the conditioner, indicating the potential of this technique for cleaner and more efficient machining processes.

Keywords: high-speed steel, drilling, metal conditioner, dry machining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais tipos de desgastes.....	15
Figura 2: Modos de desgastes	20
Figura 3: Classificação dos condicionadores de metais	21
Figura 4: Fluxograma	24
Figura 5: Tratamento das brocas	25
Figura 6: Marcação visual das arestas.....	26
Figura 7: Corpo de prova ensaiado	27
Figura 8: Gabarito de posição	28
Figura 9: Câmera termográfica	29
Figura 10: Região de corte após 16 furos. A) Broca 2. B) Broca 4.....	33
Figura 11: Maiores desgastes de flanco. A) Furo 12. B) Furo 16	34
Figura 12: Maiores desgastes de flanco broca 4 furos 16. A) Aresta 1. B) Aresta 2	35
Figura 13: Brocas pós-tratamento. A) Maior desgaste. B) Menor desgaste.....	37
Figura 14: Brocas tratadas no furo quarenta. A) Broca 1. B) Broca 2. C) Broca 3. D) Broca 4	38
Figura 15: Imagem térmica	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Desgaste brocas não tratadas.....	32
Gráfico 2: Desgaste das brocas tratadas.....	36
Gráfico 3: Comparação das Médias, Brocas Tratadas e não Tratadas	39
Gráfico 4: Média das Temperaturas	41
Gráfico 5: Brocas Tratadas.....	42
Gráfico 6: Brocas sem Tratamento.....	42
Gráfico 7: Broca Tratada.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação de massa	31
Tabela 2: Desgaste médio das arestas de corte.....	32
Tabela 3: Desgaste médio das arestas de corte das brocas tratadas	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral.....	12
2.2 Objetivos Específicos.....	12
3. REFERENCIAL TEORICO	13
3.1 PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DO AÇO RÁPIDO (HSS)	13
3.2 DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE	15
3.3 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS E MODIFICAÇÕES EM FERRAMENTAS DE CORTE	17
3.4 CONDICIONADORES DE METAIS	19
3.5 SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM USINAGEM	22
4. METODOLOGIA	24
4.1 PREPARAÇÃO DAS BROCAS	25
4.2 PRÉ TESTES	27
4.3 ENSAIOS DE USINAGEM.....	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
6. CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

Na fabricação, a furação representa aproximadamente 25% dos processos de usinagem, sendo a broca helicoidal de aço rápido (High-Speed Steel) a ferramenta mais fabricada e difundida na área (ZEILMANN, SANTIN e FINIMUNDI 2006). As brocas de HSS se destacam por serem compatíveis com as faixas de rotação apresentadas pelas principais máquinas ferramentas (SERRA *et al.*, 2020).

Segundo Costa (2004), as operações de furação possuem algumas dificuldades, sendo a principal a dificuldade, a lubrificação nas regiões das arestas cortantes, uma vez que o fluido de corte não consegue chegar a essas regiões, dificultando assim a dissipação de calor durante a usinagem. Dessa maneira, são exigidas do processo e material da ferramenta condições especiais, para enfrentar os parâmetros severos da furação (FRACARO, 2017).

Apesar desta limitação a aplicação de fluido de corte é a técnica tradicionalmente utilizada para tentar mitigar essas dificuldades. objetivo é reduzir o atrito, controlar a temperatura, melhorar o acabamento superficial e consequentemente prolongar a vida útil da ferramenta (ARIF *et al.*, 2020; SUBHEDAR *et al.*, 2021; VILANOVA *et al.*, 2023). Entretanto, o elevado custo e os problemas ambientais associados aos fluidos de corte têm restringido seu desenvolvimento (WANG *et al.*, 2023).

Em relação ao custo total de usinagem de uma peça, cerca de 17% está associado ao uso de fluidos de corte, além disso, as névoas e vapores gerados pelos óleos de corte estão ligados a problemas de saúde ocupacional, especialmente problemas de pele, que correspondem a 80% dos casos na área de produção (ISHFAQ *et al.* 2021). Com o crescimento das iniciativas de prevenção da poluição em todo o mundo e o foco do consumidor em produtos ambientalmente corretos, aumentaram as pressões sobre as indústrias para minimizar ou eliminar o uso de fluidos de corte, diante desta problemática o uso de lubrificante sólido na operação de usinagem é uma estratégia eficaz para obtenção de um sistema de usinagem sustentável (GUNDA, 2016).

Existem produtos desenvolvidos para oferecer soluções de lubrificação sólida, que ajudam a diminuir o atrito entre as superfícies de peças que se movem em contato umas com as outras, um exemplo disso são os condicionadores de metais, que podem ser utilizados em ferramentas de corte e classificados como uma forma de lubrificação sólida. O condicionador de metais é considerado uma solução moderna para a lubrificação de sistemas onde o atrito desempenha um papel significativo, supõe-se que ele forma uma camada redutora de atrito na

superfície do equipamento por meio de um processo chamado adsorção, que envolve uma reação química na qual as moléculas do óleo se fixam à superfície metálica do equipamento (OLIVEIRA et al., 2017). Segundo Calabokis et al. (2022), os condicionadores de metal são agentes redutores de atrito, desgaste e temperatura entre componentes metálicos em movimento.

O presente trabalho propõe a análise comparativa de desgastes entre brocas helicoidais de aço rápido, não tratadas e tratadas com o uso de condicionador de metais. Este tratamento visa a redução do uso de fluidos de corte em operações de furação, proporcionando uma usinagem mais sustentável.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o desgaste de brocas de HSS tratadas e não tratadas com condicionadores de metais em operações de usinagem a seco.

2.2 Objetivos Específicos

- Tratar as brocas que consistiu na imersão das ferramentas em condicionador de metais, seguida de um aquecimento controlado a 80 °C em forno mufla;
- Processo de furação realizado em uma fresadora vertical, utilizando brocas de aço rápido (HSS) com 5 mm de diâmetro e ângulo de ponta de 180°;
- Analisar o desgaste das brocas, após cada intervalo de quatro furos, as brocas foram removidas e suas arestas de corte (arestas 1 e 2) foram fotografadas;
- Monitorar a temperatura do processo de corte utilizando câmera termográfica;
- Analisar estatisticamente os desgastes das brocas por fotometria com cálculo de médias, e gráficos de evolução do desgaste ao longo dos furos.

3. REFERENCIAL TEORICO

3.1 PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DO AÇO RÁPIDO (HSS)

O aço rápido foi desenvolvido para aplicações em operações de usinagem a altas velocidades de corte se comparadas com aço-ferramenta comum, destacando-se por suas propriedades térmicas e mecânicas, ele é comumente classificado em dois grupos principais: ao molibdênio (grupo M) e ao tungstênio (grupo T), embora ambos apresentem desempenho técnico semelhante, os aços do grupo M costumam ter menor custo de produção, o que os torna economicamente mais atrativos, o HSS ao molibdênio combina elevada dureza, boa tenacidade e excelente resistência ao desgaste, sendo usualmente submetido a tratamento térmico em banhos de sais para maximizar suas propriedades, é amplamente empregado na fabricação de ferramentas de corte, como brocas, alargadores, fresas helicoidais, machos para roscas e perfuratrizes, além disso, alguns tipos específicos também são utilizados em aplicações a frio, como na confecção de punções, laminadores de rosca e matrizes para corte de discos (ANTONELLO, 2012).

Entre os elementos de ligas de aços rápidos, os principais são mostrados no quadro abaixo (CHIAVERINI, 1979).

Elementos de Liga do Aço Rápido (HSS) e suas Funções

Elemento de Liga	Função Principal e Efeitos
Carbono	Fundamental para a dureza e resistência ao desgaste. Teores mais e altos formam carbonetos complexos, aumentando a durezas
Tungstênio	principal responsável resisitência ao desgaste e e a resistência.
Molibdênio	Substituto parcial do do tungagtênio. Requer temperaturas de têmpera e endurecimento secundário.
Vanádio	Forma os carbonetos mais duros, contribuindo para a dureza a dureza a quente e eficiência de corte. Melhora a tementa a tenacidade ao limitar ro limitar o crestcimento ao grãos.
Cromo	Aumenta a temperabilidade e a resistência à oxidação, favorecendo o endurecimento.
Cobalto	

Adaptado: Chiaverini, 1979

A classificação dos aços rápidos é feita principalmente com base nos seus elementos de liga predominantes. Segundo Diniz *et al* (2013), os aços rápidos podem ser divididos em três grupos principais: aços rápidos ao tungstênio (série T), que apresentam altos teores desse elemento e são conhecidos por sua excelente dureza a quente; aços rápidos ao molibdênio (série M), que substituem parte do tungstênio pelo molibdênio, tornando a liga mais econômica e com desempenho similar em muitas aplicações; e aços rápidos ao cobalto (HSS-Co), que possuem adições de até 8% de cobalto, melhorando significativamente a resistência ao calor e ao desgaste, sendo recomendados para operações severas como corte de materiais de alta resistência ou difícil usinabilidade. Essa classificação permite uma seleção mais criteriosa do tipo de HSS a ser utilizado, de acordo com os requisitos do processo de usinagem, como tenacidade, resistência ao desgaste e estabilidade térmica.

O aço rápido (HSS) é amplamente utilizado na fabricação de ferramentas de corte devido à sua combinação equilibrada de propriedades mecânicas. Segundo Diniz, *et al* 2013, essa dureza, que normalmente ultrapassa 60 HRC, é resultado da presença de carbonetos formados por elementos de liga como tungstênio, molibdênio, cromo e vanádio, além disso, o HSS possui boa tenacidade, o que o torna menos suscetível a fraturas por impacto quando comparado a materiais mais frágeis, como o metal duro, essa tenacidade favorece sua aplicação em operações sujeitas a choques térmicos e mecânicos, como furos interrompidos ou cortes com variações de carga. A sua resistência ao desgaste também é um fator relevante, permitindo que a ferramenta mantenha o fio de corte por mais tempo, mesmo em operações contínuas, essas características fazem do HSS um material versátil e eficiente para ferramentas rotativas e de geometria complexa, especialmente em condições de usinagem com lubrificação limitada ou intermitente (Diniz *et al* 2013).

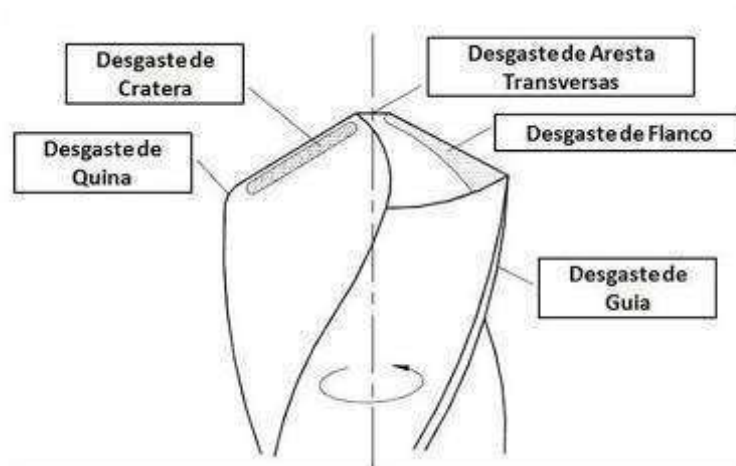
O aço rápido (HSS) é tradicionalmente utilizado em ferramentas de corte devido à sua combinação equilibrada de dureza, tenacidade e resistência ao desgaste, entretanto, comparado a materiais mais modernos como o metal duro (carbeto cementado) e as cerâmicas, o HSS apresenta limitações em termos de resistência a temperaturas elevadas e vida útil em usinagem de alta velocidade, o metal duro oferece uma dureza significativamente maior e melhor resistência ao desgaste térmico, tornando-se mais eficiente em operações de usinagem de materiais duros e em altas velocidades de corte (KUMAR *et al.* 2020). Essas limitações tornam o HSS mais suscetível ao desgaste precoce em determinadas condições de corte, especialmente sob altas temperaturas. Assim, compreender os mecanismos de desgaste

em ferramentas de corte torna-se essencial para aprimorar seu desempenho e prolongar sua vida útil.

3.2 DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE

No processo de usinagem, duas principais causas podem justificar a substituição da ferramenta de corte: avarias ou falhas catastróficas como lascamentos, trincas ou até mesmo a quebra da ferramenta e o desgaste excessivo, que compromete as condições de corte e a qualidade da peça usinada, diferentemente das falhas súbitas, que ocorrem de forma inesperada, o desgaste da ferramenta é um fenômeno progressivo, presente tanto em operações de corte contínuo quanto em corte interrompido, e pode se manifestar por meio de diferentes mecanismos, dependendo das condições do processo (AMORIM, 2002). A Figura 1 apresenta a representação dos principais tipos de desgaste observados em brocas helicoidais.

Figura 1: Principais tipos de desgastes



Fonte: Adaptado Vaz, 2022

Quando as arestas de corte de uma broca helicoidal deixam de apresentar condições adequadas para a furação, verifica-se a ocorrência de desgastes caracterizados pela remoção contínua de material durante a operação, ou de avarias mais severas, como trincas, lascamentos ou fraturas, que inutilizam a ferramenta de maneira abrupta (MACHADO et al., 2015). Os critérios que definem o fim de vida da ferramenta de corte estão associados às condições que impedem a continuidade do processo conforme as tolerâncias especificadas

para os furos. Além do desgaste e das avarias, a elevação da rugosidade da superfície usinada e as variações dimensionais também são fatores determinantes para a substituição da ferramenta. A velocidade de corte (v_c) exerce influência direta sobre esse comportamento: à medida que a v_c aumenta, há uma elevação significativa da temperatura na zona de corte, o que favorece o desgaste acelerado e o surgimento de falhas, podendo levar à quebra ou à perda funcional da broca (DINIZ *et al.*, 2013; KLOCKE, 2011; MACHADO *et al.*, 2015).

O desgaste de flanco é um dos principais tipos de desgaste encontrados em brocas helicoidais, manifestando-se na superfície de folga da ferramenta, local onde ocorre o contato direto com a peça usinada, esse tipo de desgaste pode ser observado tanto na aresta principal quanto na aresta transversal de corte, a largura da marca de desgaste de flanco (VB) é amplamente utilizada como critério de monitoramento da vida útil da ferramenta, sendo recomendado que esse valor não ultrapasse 0,3 mm para que a reafiação seja viável, além disso, os desgastes localizados na quina e nas guias da broca influenciam diretamente a eficiência da evacuação do cavaco e a precisão dimensional dos furos produzidos. Outro tipo relevante é o desgaste de cratera, que ocorre na face de saída da broca, decorrente do atrito contínuo durante a remoção dos cavacos, esse desgaste é intensificado pela elevação da temperatura na zona de corte e pela afinidade química entre os materiais da ferramenta e da peça, já na região central da broca, onde a velocidade de corte é naturalmente mais baixa, o desgaste na aresta transversal tende inicialmente a gerar um efeito de autoafiação, no entanto, esse efeito é posteriormente neutralizado pela formação da aresta postiça de corte (APC), típica de condições com baixa velocidade de corte (AGAPIOU; STEPHENSON, 2013; DINIZ *et al.*, 2013).

As avarias nas arestas de corte, como lascamentos, fissuras transversais e longitudinais, além de deformações plásticas, são geralmente provocadas por solicitações térmicas e mecânicas excessivas durante o processo de usinagem. Forças de corte elevadas podem originar microlascamentos e lascamentos tanto na aresta principal quanto na quina da ferramenta, sendo essas falhas mais comuns em ferramentas com ângulo de ponta reduzido ou quando se trabalha com materiais frágeis, além disso, interrupções no corte favorecem a ocorrência de lascamentos, especialmente na usinagem de materiais tenazes, nos quais os cavacos possuem maior tendência a caldear ou se soldar na face da broca, microlascamentos também são frequentemente observados na usinagem de materiais duros ou que contenham inclusões rígidas, nesses casos, ferramentas fabricadas em metal duro se mostram mais vulneráveis a falhas localizadas, sobretudo em operações com seções de corte reduzidas, como no alargamento e no brochamento (VAZ, 2022).

Os lascamentos nas ferramentas de corte são falhas recorrentes quando os parâmetros e as condições do processo de furação não são devidamente controlados, fatores como batimento radial elevado da broca, ausência ou insuficiência de lubrificação e refrigeração na região de corte, bem como a presença de desgastes já avançados, favorecem esse tipo de avaria, além disso, o uso de ferramentas fabricadas com materiais de menor tenacidade, geometrias inadequadas à aplicação ou a ocorrência de choques intensos entre a ferramenta e a peça também contribuem significativamente para a ocorrência de lascamentos (DINIZ et al., 2013).

Durante o processo de usinagem, a broca helicoidal está sujeita a diferentes tipos de esforços, incluindo forças axiais, de flexão e de torção, embora o torque necessário para romper a ferramenta normalmente exceda os esforços aplicados durante a operação, o desgaste progressivo da broca pode gerar variações de torque que ultrapassam o limite de resistência à fadiga do material, nesses casos, o lascamento ou a fratura da ferramenta geralmente ocorrem devido a esforços alternados, especialmente em regiões críticas como a quina e a guia, a formação de aresta postiça de corte (APC) também intensifica esse efeito: o material aderido à aresta se deforma e sofre encruamento, adquirindo temporariamente a função de corte, no entanto, com o tempo, essa estrutura se rompe abruptamente, provocando o lascamento da ferramenta. Adicionalmente, a ferramenta está suscetível à fadiga térmica e mecânica, a fadiga térmica é causada por variações bruscas de temperatura, comuns em processos como a furação profunda, onde a refrigeração intermitente pode gerar choques térmicos, caso a broca não apresente tenacidade suficiente, essas flutuações térmicas podem resultar na formação de fissuras, por outro lado, a fadiga mecânica decorre das oscilações nas forças de corte durante a entrada da ferramenta no material e ao longo do avanço, o que também contribui para falhas prematuras (SOUZA, 2016; TSCHÄTSCH, 2009).

Diante desses desafios operacionais, surge a necessidade de adotar estratégias que melhorem a resistência das ferramentas de corte. Nesse contexto, os tratamentos superficiais e modificações estruturais nas brocas têm se mostrado alternativas promissoras para prolongar sua vida útil e desempenho em usinagem.

3.3 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS E MODIFICAÇÕES EM FERRAMENTAS DE CORTE

Os tratamentos superficiais e térmicos aplicados a ferramentas de corte em aço rápido (HSS) visam otimizar propriedades como dureza, resistência ao desgaste e vida útil. Esses

processos alteram a microestrutura superficial sem modificar a geometria da ferramenta, adaptando-se a exigências industriais crescentes.

(ROSA *et al.*, 2017), pode-se afirmar que o tratamento térmico de têmpera e revenimento é essencial para otimizar as propriedades do aço rápido, um dos mais utilizados na fabricação de ferramentas de corte. A têmpera promove a formação de uma matriz martensítica com presença de austenita retida e carbonetos finamente distribuídos, resultando em alta dureza e resistência ao desgaste. Já o revenimento, especialmente em temperaturas elevadas, favorece o fenômeno de endurecimento secundário causado pela precipitação de carbonetos finos de elementos de liga como Mo, W, V e Cr que melhora a dureza a quente e a estabilidade dimensional do material.

Os tratamentos superficiais também são empregados, a nitretação a plasma é um tratamento superficial amplamente utilizado em ferramentas de aço rápido (HSS), visando aumentar a dureza superficial, melhorar a resistência ao desgaste e estender a vida útil das ferramentas sem comprometer a tenacidade do núcleo, a nitretação a plasma se destaca por permitir o controle preciso das condições de processo, apresentar boa reprodutibilidade e causar menor impacto ambiental em comparação a outros métodos convencionais de endurecimento superficial (SERRA, et al., 2020).

Outro tratamento superficial que se destaca são os de deposição física de vapor (PVD) e deposição química de vapor (CVD) são amplamente utilizados para o revestimento de ferramentas de corte, como as produzidas em aço rápido, esses processos têm como objetivo principal aumentar a vida útil da ferramenta, proporcionando maior resistência ao desgaste, à abrasão e à oxidação térmica durante o processo de usinagem, o revestimento PVD destaca-se por operar a temperaturas mais baixas, o que o torna especialmente vantajoso para ferramentas com geometria fina ou que não suportariam temperaturas elevadas, já o processo CVD, realizado a temperaturas próximas de 1000 a 1200 °C, forma revestimentos mais espessos e com melhor aderência em aplicações de corte pesado, sendo mais resistente a altas temperaturas, Ambos os processos, PVD e CVD, são indicados para aumentar o desempenho de ferramentas de aço rápido, sendo a escolha entre eles dependente das condições de corte e do material a ser usinado (COSTA, 2016).

Os tratamentos térmicos convencionais, como têmpera, revenimento e nitretação, são amplamente utilizados para aumentar a dureza superficial e a resistência ao desgaste de ferramentas de corte, mas envolvem processos complexos, consumo elevado de energia e

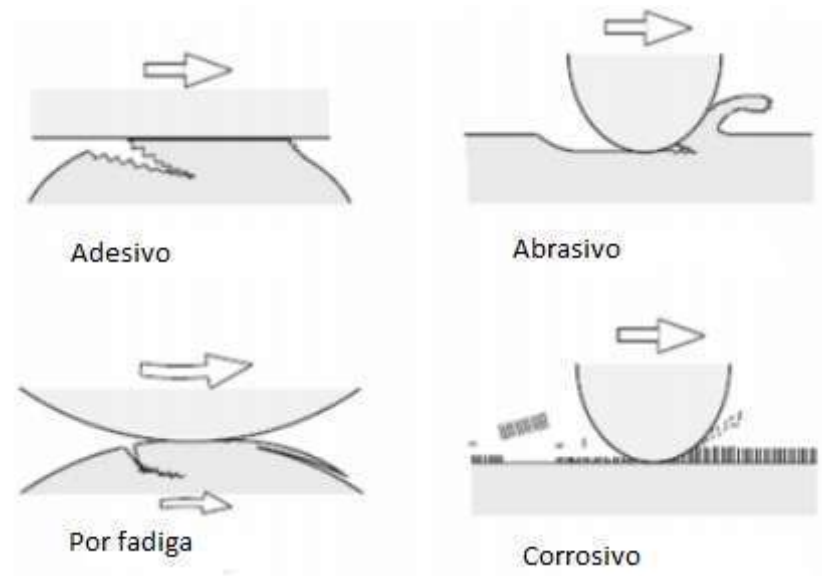
podem causar distorções dimensionais e tensões residuais no material (ROSA et al., 2017; SERRA et al., 2020). Em contrapartida, o tratamento com condicionadores de metais apresenta-se como uma alternativa mais simples, de aplicação a baixa temperatura, que forma uma película protetora por adsorção sobre a superfície da ferramenta, reduzindo atrito e desgaste sem alterar sua estrutura interna (ALLY, 2022; OLIVEIRA et al., 2014). Além disso, esse tipo de tratamento é ambientalmente mais sustentável, pois dispensa a utilização de grandes volumes de fluido de corte e não demanda infraestrutura térmica complexa. Assim, os condicionadores de metais podem oferecer desempenho comparável ao de tratamentos térmicos em determinadas aplicações, com menor impacto ambiental e operacional (SOUZA, et al., 2019).

3.4 CONDICIONADORES DE METAIS

De forma geral, o atrito pode ser entendido como a perda progressiva de energia cinética, resultante do movimento relativo entre corpos ou substâncias. Segundo Sembarski (2018), esse fenômeno apresenta diversas classificações conforme suas características específicas. Medeiros (2010) complementa que o atrito é causado pela rugosidade ou aspereza existente entre duas superfícies sólidas em contato, permitindo a troca de forças em direção tangencial à área de contato.

Tanto o atrito quanto o desgaste são influenciados por fatores como pressão de contato, velocidade relativa e propriedades dos materiais envolvidos, o desgaste, por sua vez, é o resultado de uma ação mecânica contínua e, frequentemente, está diretamente relacionado ao atrito entre superfícies (ZMITROWICZ, 2006). No campo da tribologia, que estuda as interações entre superfícies em movimento relativo, o desgaste é amplamente investigado e pode ser classificado em quatro modos principais: desgaste adesivo, abrasivo, por fadiga e corrosivo (KATO, 2001). A Figura 2 mostra esses modos principais.

Figura 2: Modos de desgastes



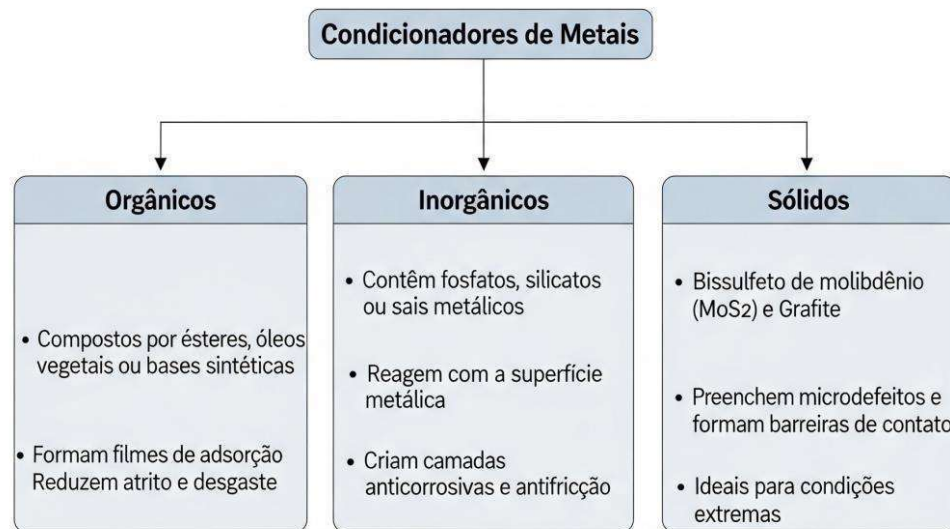
Fonte: Adaptado Malheiros, 2013

Os estudos tribológicos concentram-se especialmente na análise do atrito, do desgaste e da lubrificação. Esta última tem recebido destaque na engenharia mecânica, sobretudo por seus efeitos benéficos na mitigação do atrito e na preservação de componentes industriais (SEMBARSKI, 2018). Nesse sentido, Carreteiro e Belmiro (2006) definem a lubrificação como o fenômeno responsável pela redução do atrito por meio da interposição de uma substância lubrificante, que minimiza o contato direto entre superfícies em movimento relativo.

Nesse contexto, surgem os condicionadores de metais, compostos químicos desenvolvidos para atuar de forma complementar aos lubrificantes convencionais. Sua principal função é promover a formação de uma camada protetora sobre superfícies metálicas, reduzindo o contato direto entre elas e, conseqüentemente, minimizando o desgaste, o atrito e a corrosão. Como resultado, há um ganho significativo em eficiência operacional e prolongamento da vida útil dos componentes (ROSSO; COSTA, 2021).

Esses condicionadores podem ser classificados segundo sua natureza química em três grandes grupos: orgânicos, inorgânicos e sólidos, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Classificação dos condicionadores de metais



Fonte: Autoria própria, 2025

Os condicionadores orgânicos geralmente são compostos por ésteres, óleos vegetais modificados ou bases sintéticas, que formam filmes de adsorção sobre as superfícies metálicas, proporcionando redução de atrito e desgaste com baixo consumo de fluido (CALABOKIS, 2024). Já os condicionadores inorgânicos contêm compostos ativos como fosfatos, silicatos ou sais metálicos, que reagem com a superfície metálica, criando camadas anticorrosivas e antifricção (ALLY, 2022). Por sua vez, os condicionadores de natureza sólida, como o bissulfeto de molibdênio (MoS₂) e o grafite, destacam-se pela elevada estabilidade térmica e excelente capacidade de lubrificação em condições extremas. Esses materiais atuam preenchendo microdefeitos nas superfícies e formando barreiras de contato que são altamente eficazes, sobretudo em processos de usinagem a seco ou com lubrificação mínima (MARQUES, 2015; ROSSO, 2021).

Além disso, o condicionador de metais pode ser considerado uma forma moderna de lubrificação líquida em sistemas dominados por atrito, atuando por meio de um processo denominado adsorção. Esse fenômeno, caracterizado pela fixação de camadas de óleo na superfície metálica por interações físico-químicas, forma uma verdadeira "barreira antiatrito", que contribui para reduzir os desgastes localizados e estabilizar a temperatura na zona de corte (OLIVEIRA et al., 2014).

Além de melhorar o desempenho das ferramentas, o uso de condicionadores de metais também traz benefícios ambientais e econômicos. Esses aspectos são fundamentais para

entender a crescente importância da sustentabilidade e da eficiência energética nos processos de usinagem.

3.5 SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM USINAGEM

A utilização de fluidos de corte em processos de usinagem, embora essencial para melhorar o desempenho tribológico e aumentar a vida útil das ferramentas, representa um significativo impacto ambiental e à saúde ocupacional. De acordo com Oliveira e Alves (2007), os fluidos de corte são responsáveis por uma série de efeitos adversos, incluindo a emissão de vapores e aerossóis contaminantes, poluição do solo e da água devido ao descarte inadequado. Esses efeitos não apenas impõem riscos ao operador e ao ambiente de trabalho, como também resultam em custos elevados com tratamento, descarte e controle ambiental.

Como alternativa mais limpa e eficiente, destacam-se os condicionadores de metais, que atuam na superfície da ferramenta formando uma película protetora por adsorção físico-química, ao contrário dos fluidos convencionais, os condicionadores de metais não requerem grandes volumes de aplicação nem geram resíduos líquidos, reduzindo significativamente os danos ambientais e os riscos à saúde humana, além disso, contribuem para o aumento da vida útil das ferramentas sem comprometer o desempenho do processo, sendo uma solução alinhada com os princípios da Produção mais limpa (P+L) (OLIVEIRA; ALVES, 2007).

A técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) surgiu como uma alternativa viável aos métodos convencionais de lubrificação abundante, com o propósito de reduzir significativamente o consumo de fluidos de corte e os impactos ambientais associados, trata-se de uma técnica que utiliza quantidades muito pequenas de fluido geralmente entre 5 a 100 ml/h atomizado por ar comprimido, o que possibilita a formação de uma névoa direcionada à zona de corte, promovendo tanto a lubrificação quanto o resfriamento da ferramenta e da peça, entre suas principais vantagens destacam-se a redução do descarte de resíduos, menor contaminação ambiental, maior segurança ao operador e economia no consumo de insumos (FORTES; STELLE, 2020). Além disso, sistemas MQL evitam o uso contínuo de tanques, tubulações e filtros, minimizando os custos operacionais. Quando corretamente aplicada, essa técnica é capaz de oferecer desempenho térmico e tribológico comparável ao da lubrificação por jorro, sendo especialmente vantajosa em processos de furação, fresamento e torneamento,

desde que os parâmetros do processo permitam sua aplicação eficaz (RIBEIRO, 2017; HEISEL et al., 1998).

Os condicionadores de metais se destacam por oferecerem benefícios ambientais significativos em comparação aos fluidos de corte tradicionais. Estudos realizados com ferramentas de cortes tratados e não tratados demonstram que os condicionadores reduzem substancialmente o atrito e o desgaste durante operações mecânicas (DIAS, 2023). Em outro trabalho, Rosso (2021) comparou o desempenho de condicionadores metálicos e óleo comum em ensaios pino-sobre-disco, evidenciando uma queda relevante no coeficiente de atrito com o uso dos aditivos metálicos, ao agirem por adsorção sobre a superfície da ferramenta, esses produtos formam camadas protetoras eficientes, evitando o uso de grandes volumes de fluido e reduzindo a geração de resíduos líquidos tóxicos, ou seja, ao mesmo tempo em que mantêm a performance tribológica, diminuem o impacto ambiental associado ao descarte de fluidos contaminantes contribuindo com processos de usinagem mais sustentáveis e alinhados às garantias da economia circular.

4. METODOLOGIA

Com base nos objetivos estabelecidos para este trabalho, foi elaborado um fluxograma, Figura 4, com o intuito de apresentar de forma clara e objetiva a metodologia adotada na pesquisa.

Figura 4: Fluxograma



Fonte: Autoria própria, 2025

A realização dos ensaios deste trabalho ocorreu nas dependências da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), com a utilização dos Laboratórios de Ensaios Mecânicos e de Metalografia para o tratamento das brocas com o condicionador de metais Militec-1, e do Laboratório de Usinagem e Soldagem para a execução dos ensaios de furação.

4.1 PREPARAÇÃO DAS BROCAS

Quatro brocas foram tratadas com o condicionador de metais Militec-1, onde o tratamento consistiu na imersão das pontas das brocas no produto, dentro de um Becker, onde o condicionador imergiu aproximadamente duas vezes a profundidade do furo, seguida de aquecimento em forno Mufla com a temperatura de 80°C por 30 minutos em atmosfera ambiente, Figura 5. As faixas de temperatura e de tempo foram escolhidas com base na literatura (SILVA, 2014).

Figura 5: Tratamento das brocas



Fonte: Autoria própria, 2025

Para verificar a efetividade da adsorção do condicionador metálico, foi realizada a pesagem apenas das brocas, e depois do becker juntamente com o condicionador de metais antes e após o tratamento, utilizando balança de precisão, a fim de observar eventuais variações de massa indicativas da adsorção do condicionador.

Outras quatro brocas foram utilizadas sem qualquer tipo de tratamento, ambos os processos de furação se caracterizam a condição de usinagem a seco. A usinagem a seco refere-se ao processo de corte realizado sem a utilização de fluidos de corte, como óleos ou emulsões, que normalmente têm a função de lubrificar, refrigerar e remover cavacos da zona de corte.

Foi necessário adotar um sistema de identificação visual nas brocas, Figura 6, com o objetivo de garantir que não houvesse repetibilidade de imagens ou perda de dados. Para isso,

foi realizada uma marcação no corpo de cada broca com o auxílio de uma caneta elétrica, traçando uma linha paralela a uma das arestas principais.

Figura 6: Marcação visual das arestas



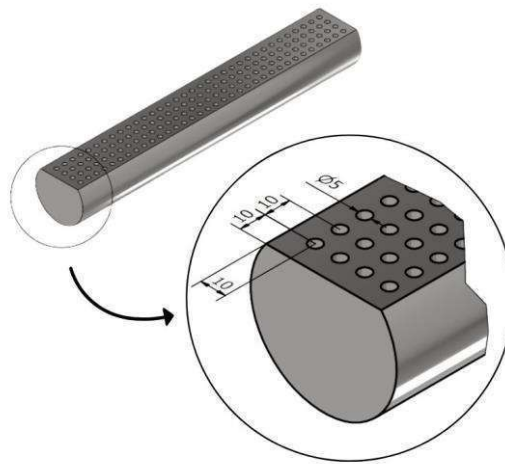
Fonte: Autoria própria, 2025

A aresta de corte adjacente à marcação foi padronizada como aresta 1, enquanto a oposta, sem qualquer marcação, foi denominada aresta 2. Esse procedimento simples, porém, fundamental, permitiu distinguir com clareza as regiões analisadas ao longo dos ensaios, evitando erros na sequência de medições e contribuindo para a confiabilidade e rastreabilidade dos dados coletados.

4.2 PRÉ TESTES

Antes do início das furações, um tarugo de aço AISI 1045 foi usinado na fresadora, a fim de obter uma superfície plana adequada à realização dos ensaios de furação. Com a superfície preparada, foram realizados pré-testes experimentais, com uma broca sem tratamento, por meio dos quais se definiu o valor da profundidade e velocidade de avanço automático a ser utilizado nas furações, assim como a distância entre os centros dos furos. O corpo de prova utilizado é mostrado na Figura 7. Os critérios para o término dos ensaios foram o a conclusão de 40 furos ou a presença de desgastes severos.

Figura 7: Corpo de prova ensaiado



Fonte: Autoria própria, 2025

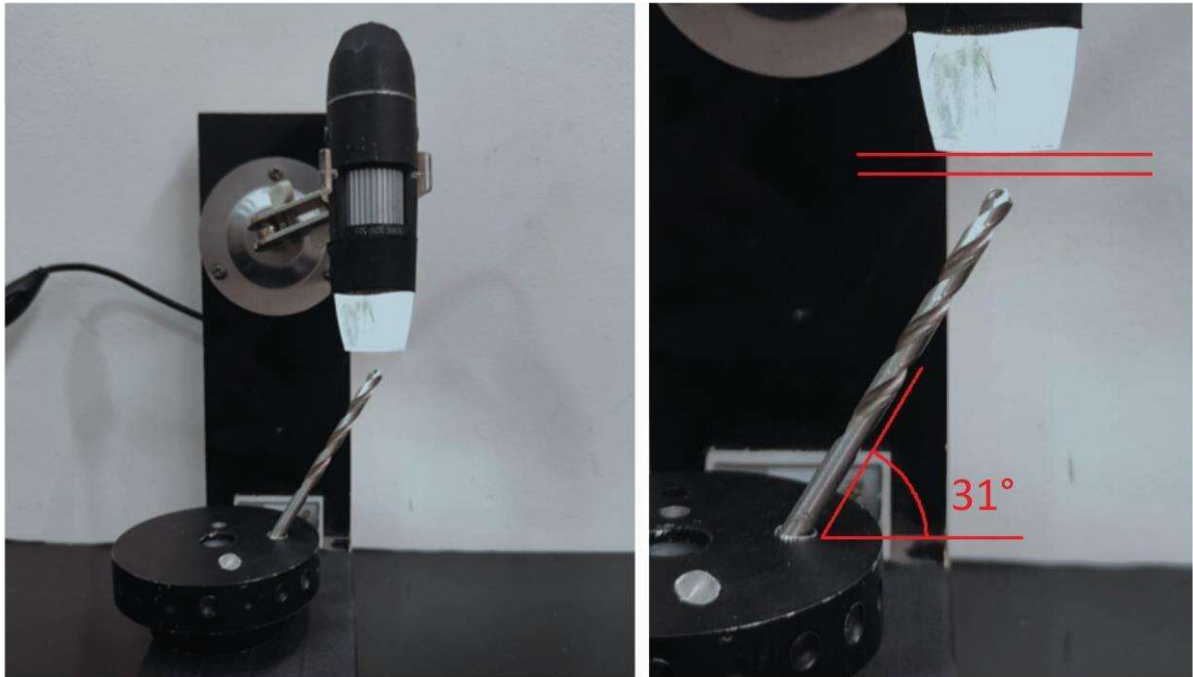
Para os ensaios foram utilizadas brocas helicoidais de HSS com 5 mm de diâmetro com ângulo de afiação de ponta de 118° . A rotação utilizada foi de 1500 rpm, proporcionando assim uma velocidade de corte de 24 m/min.

4.3 ENSAIOS DE USINAGEM

Para garantir a repetibilidade das medições e padronizar a análise do desgaste, foi confeccionado um gabarito de posicionamento, Figura 8, assegurando que todas as brocas permanecessem na mesma posição e altura em relação à câmera do microscópio digital. O suporte foi projetado de forma que a inclinação do furo executado no tarugo reproduzisse exatamente a inclinação necessária para posicionar a aresta cortante da broca paralela ao plano focal do microscópio. Esse furo foi realizado na própria fresadora, mediante o ajuste

angular do cabeçote da máquina, o que garantiu precisão na inclinação e estabilidade do posicionamento durante todas as medições. A utilização desse gabarito foi essencial para garantir a confiabilidade e a repetibilidade dos dados obtidos, uma vez que eliminou possíveis variações no ângulo de observação ou na distância focal durante a captura das imagens de desgaste.

Figura 8: Gabarito de posição



Fonte: Autoria própria, 2025

O microscópio digital foi montado diretamente acima do gabarito de posicionamento, de forma a garantir que a captura das imagens ocorresse com a lente paralela às arestas das brocas, assegurando a uniformidade na análise do desgaste. Para evitar interferências externas, como reflexos ou variações na luminosidade ambiente, o conjunto foi instalado dentro de uma caixa, que era fechada após o posicionamento da broca no gabarito.

Já a câmera termográfica foi posicionada acima do corpo de prova, próxima à região de corte da broca, para capturar as variações de temperatura após o processo de furação. Essa câmera foi acoplada a um suporte em 3D, Figura 9, confeccionado de modo que seu encaixe garantisse uma posição plana e estável sobre o corpo de prova, permitindo a obtenção de imagens térmicas com boa definição e reprodutibilidade.

Figura 9: Câmera termográfica



Fonte: Autoria própria, 2025

As operações de furação foram realizadas em uma fresadora Eurostec, modelo FTV-H6, equipada com avanço vertical automático do cabeçote, garantindo a uniformidade da operação e eliminando a influência do operador no processo. Junto com as furações ocorreu a coleta de dado das temperaturas por meio de uma câmera termográfica, onde foram coletados os picos de temperatura a fim de avaliar se as brocas tratadas atingiam picos menores.

A medição do desgaste de flanco das brocas foi realizada por meio da análise das imagens obtidas com um microscópio digital, acoplado a um suporte fixo posicionado diretamente acima do gabarito de posicionamento das ferramentas. As imagens foram capturadas e processadas utilizando o software Imagem Pro. (WIN), ferramenta amplamente utilizada para análise fotométrica e quantificação de áreas em microscopia.

Durante os ensaios, foram registradas imagens de cada broca a cada quatro furos executados, tanto no grupo tratado com o condicionador de metais quanto no grupo não tratado. Essa frequência de monitoramento permitiu acompanhar a evolução do desgaste de

forma contínua, facilitando a identificação de variações no comportamento entre as condições testadas.

A análise foi conduzida sobre as duas arestas principais de corte de cada broca, previamente identificadas como aresta 1 e aresta 2, conforme o sistema de marcação adotado. As medições foram realizadas sobre a largura do desgaste de flanco (VB), sendo essa a referência técnica para determinação da vida útil das ferramentas. O uso do software possibilitou a mensuração precisa das regiões desgastadas.

Os dados obtidos por meio da termografia forneceram análises importantes para a compreensão dos efeitos do atrito na zona de corte, especialmente nas condições de usinagem a seco. Buscando observar as variações de temperatura nas ferramentas para reforçar a hipótese de que o condicionador de metais não atua como refrigerante, reduzindo o calor gerado na zona de corte, mas sim como um lubrificante, agindo na redução de desgaste das ferramentas. Vale destacar que as temperaturas apresentadas são os valores coletados por radiação infravermelho do equipamento e não são as temperaturas reais desenvolvidas na região de corte.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os pré-testes iniciais se definiu o valor da profundidade e velocidade de avanço automático a ser utilizado nas furações, valor definido de 7,5 mm e 0,038 mm/ver, respectivamente. A distância entre os centros dos furos foi de 10 mm fazendo com que a porção de material entre os furos fosse de 5 mm e a distância entre os furos e a margem da superfície foi de 10 mm.

A avaliação da adsorção do condicionador de metais foi realizada através da medição das massas das brocas e do próprio condicionador, tanto antes quanto após o tratamento. Conforme mostrado na Tabela 1, que apresenta o somatório das massas de todas as brocas. Observa-se que, após o tratamento, o condicionador de metais apresentou uma redução de massa de 0,219 g, enquanto as brocas registraram um aumento de 0,192 g. Esses dados indicam que aproximadamente 0,192 g do condicionador foram adsorvidos pelas brocas durante o processo, enquanto os 0,027 g restantes provavelmente se perderam por evaporação ao longo do aquecimento.

Tabela 1: Variação de massa

	Antes do Tratamento	Após o Tratamento	Variação de Massa
Ferramentas	42,520g	42,712g	+0,192g
Condicionador de metais	75,133g	74,914	-0,219g

Fonte: Autoria própria, 2025

Como demonstrado na Tabela 1, houve um aumento na massa das brocas após o tratamento, enquanto a massa do condicionador apresentou uma diminuição. Esse resultado indica que o condicionador foi adsorvido pelas brocas durante o processo. É importante destacar que não houve desperdício ou perda de material durante o tratamento, o que reforça a hipótese de que o condicionador foi efetivamente adsorvido pelas brocas, contribuindo para uma análise mais precisa da eficácia do tratamento.

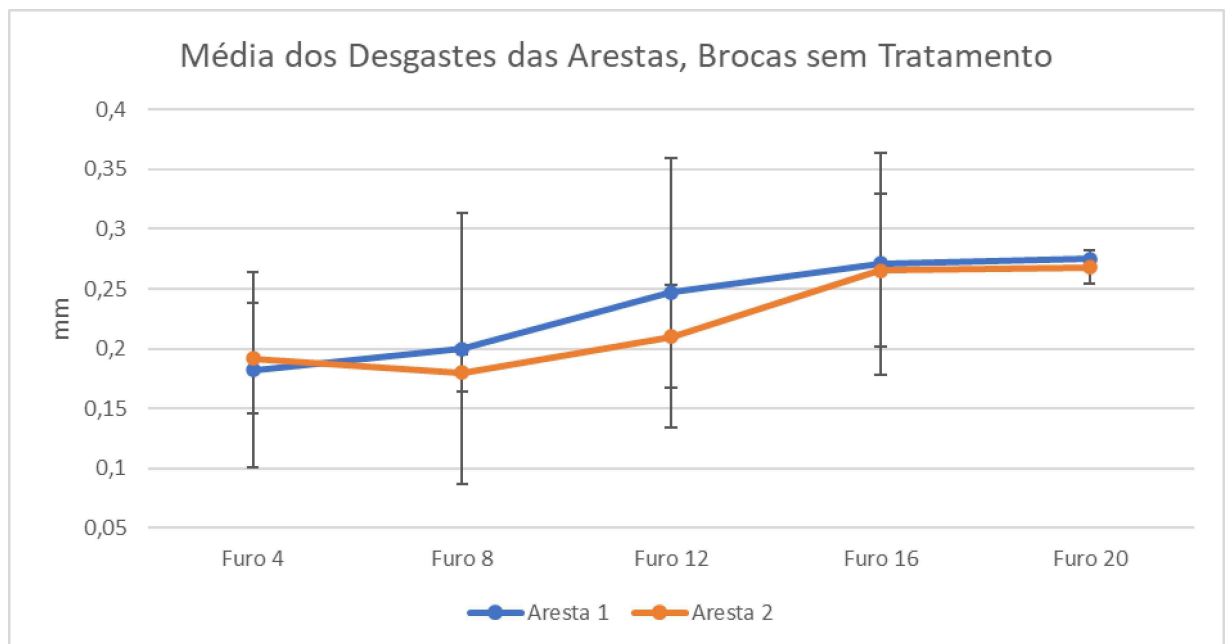
De acordo com Oliveira (2017), a aplicação de condicionadores de metais em ferramentas de corte pode reduzir significativamente o desgaste, uma vez que esses produtos promovem a formação de uma película protetora nas superfícies metálicas. Essa camada atua como uma barreira entre a ferramenta e o material a ser usinado, minimizando o atrito direto durante o corte.

Assim, os resultados da pesagem antes e depois do tratamento corroboram a literatura, evidenciando a capacidade do condicionador metálico de aderir às brocas e, potencialmente, contribuir para o aumento da vida útil das ferramentas e a melhoria do desempenho em operações de usinagem sem o uso de fluidos lubrificantes.

Após a etapa de tratamento e análise de massa das brocas, foi realizada a avaliação do desgaste de flanco das ferramentas durante o processo de furação. Essa análise tem como objetivo verificar a eficácia do condicionador de metais na redução do desgaste nas arestas de corte, comparando os resultados obtidos entre as brocas tratadas e não tratadas com condicionador de metais.

O Gráfico 1 e a Tabela 2 apresentam os valores médios dos desgastes de flanco nas arestas 1 e 2 das brocas não tratadas, aferidos a cada quatro furos ao longo de um total de vinte furações.

Gráfico 1: Desgaste brocas não tratadas



Autoria própria, 2025

Tabela 2: Desgaste médio das arestas de corte

	Furo 4	Furo 8	Furo 12	Furo 16	Furo 20
Aresta 1 (mm)	0,182	0,200	0,247	0,271	0,275
Aresta 2 (mm)	0,192	0,180	0,210	0,265	0,268

Autoria própria, 2025

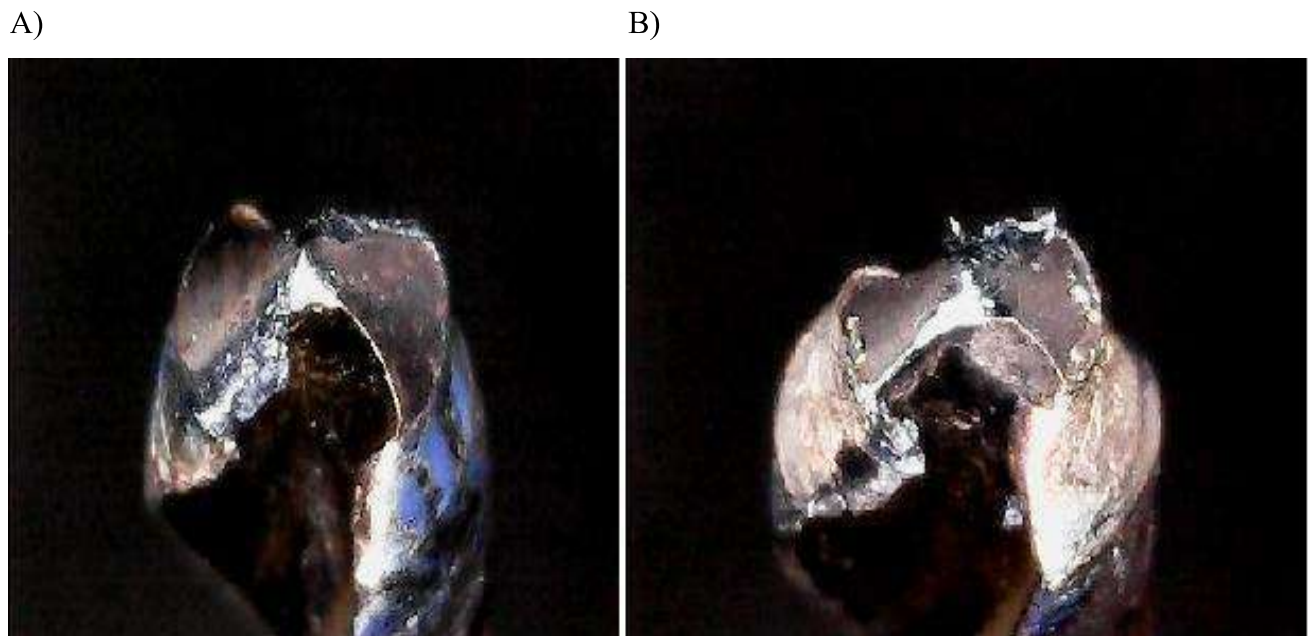
Observa-se, de maneira geral, uma tendência de aumento progressivo dos desgastes em ambas as arestas. No furo quatro, a média dos desgastes foram relativamente baixos e semelhantes (0,182 mm na aresta 1 e 0,192 mm na aresta 2), porém, à medida que as furações avançaram, principalmente a partir do furo oito, nota-se um aumento expressivo dos valores.

No estudo de Teixeira e Daleffe (2021), ao comparar as curvas de desgaste entre dois processos, observou-se um comportamento caracterizado por maior desgaste e menor vida útil da ferramenta, um padrão que também foi observado no presente trabalho. Esse resultado é considerado desejável em estudos que buscam acelerar o desgaste para fins de análise comparativa.

Cabe destacar que duas brocas (números 2 e 4) atingiram o fim de vida útil após o furo dezesseis, motivo pelo qual não foram consideradas na medição do furo vinte. Fazendo então a média para esses furos com apenas as brocas 1 e 3.

A taxa de desgaste observada confirma a limitação do processo de furação com brocas de HSS sem o uso de fluidos lubrificantes. As imagens das brocas 2 e 4, que atingiram o fim da vida antes de completar os 20 furos são mostradas na Figura 10.

Figura 10: Região de corte após 16 furos. A) Broca 2. B) Broca 4



Fonte: Autoria própria, 2025

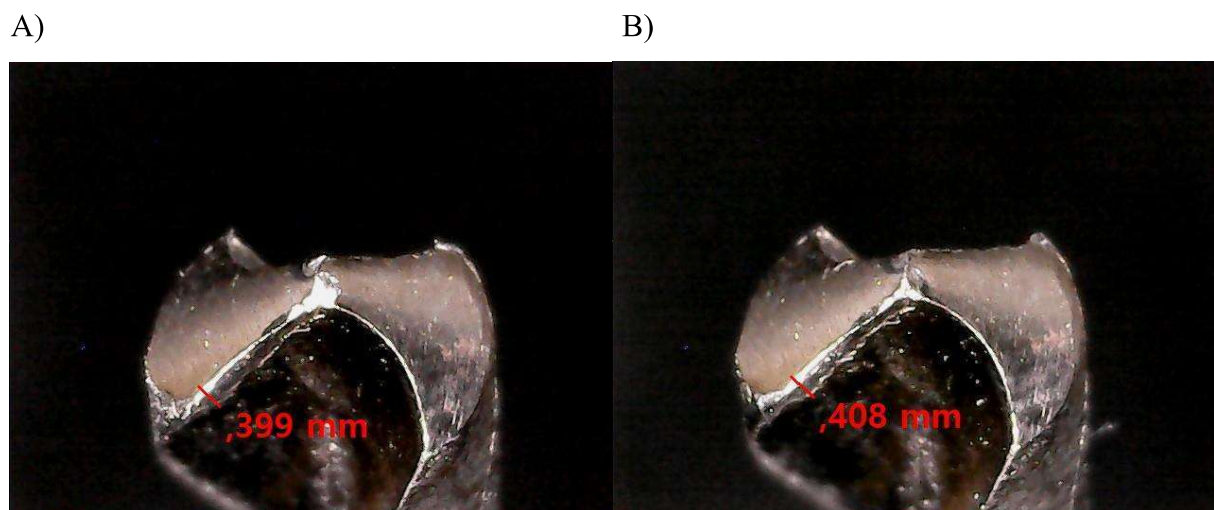
As imagens A e B mostram o estado final das brocas 2 e 4 após o furo 16, ponto em que ambas foram retiradas dos ensaios por atingirem o critério de fim de vida, definido por

desgaste severo. Observa-se em ambas as ferramentas desgaste severo na região da aresta de corte, com sinais evidentes de lascamentos, deformações plásticas e fraturas localizadas, especialmente na broca 4 (imagem B), cuja falha é mais pronunciada.

Esses tipos de danos são característicos de sobrecarga térmica e mecânica, comuns em processos de usinagem onde não há lubri-refrigeração suficiente para dissipar o calor gerado na zona de corte. A ausência de fluido de corte compromete o escoamento de cavacos e contribui para o aumento do atrito e da temperatura, fatores que aceleram o desgaste e favorecem a ruptura prematura da ferramenta.

Após a medição dos desgastes de flanco, observou-se que, dentre as brocas não tratadas, a broca 2 apresentou os maiores valores pontuais de desgaste como mostrado na Figura 11, atingindo 0,399 mm no 12º furo e 0,408 mm no 16º furo, ambas na aresta 1.

Figura 11: Maiores desgastes de flanco. A) Furo 12. B) Furo 16



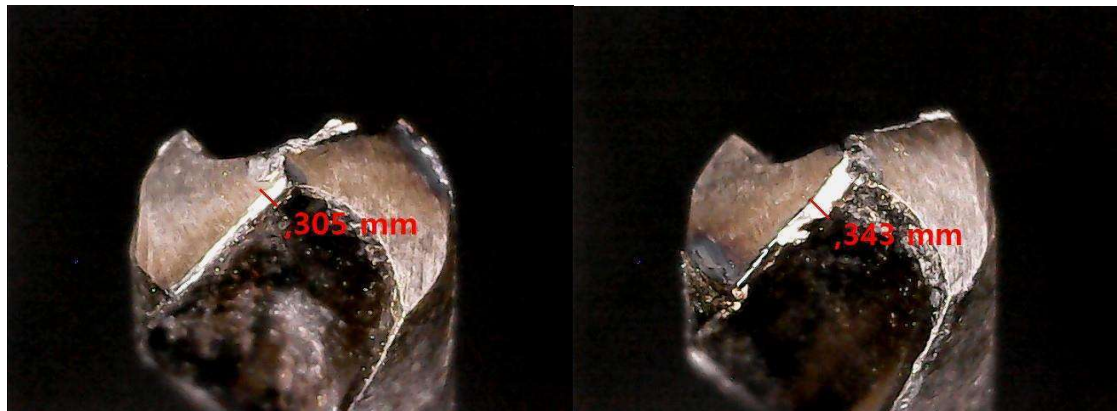
Fonte: autoria propria, 2025

Na Figura 12, observam-se os maiores desgastes de flanco registrados na broca 4, ambos no furo 16. A imagem A mostra a aresta 1, com desgaste de 0,305 mm, enquanto a imagem B revela a aresta 2, com um desgaste ainda mais acentuado de 0,343 mm.

Figura 12: Maiores desgastes de flanco broca 4 furos 16. A) Aresta 1. B) Aresta 2

A)

B)



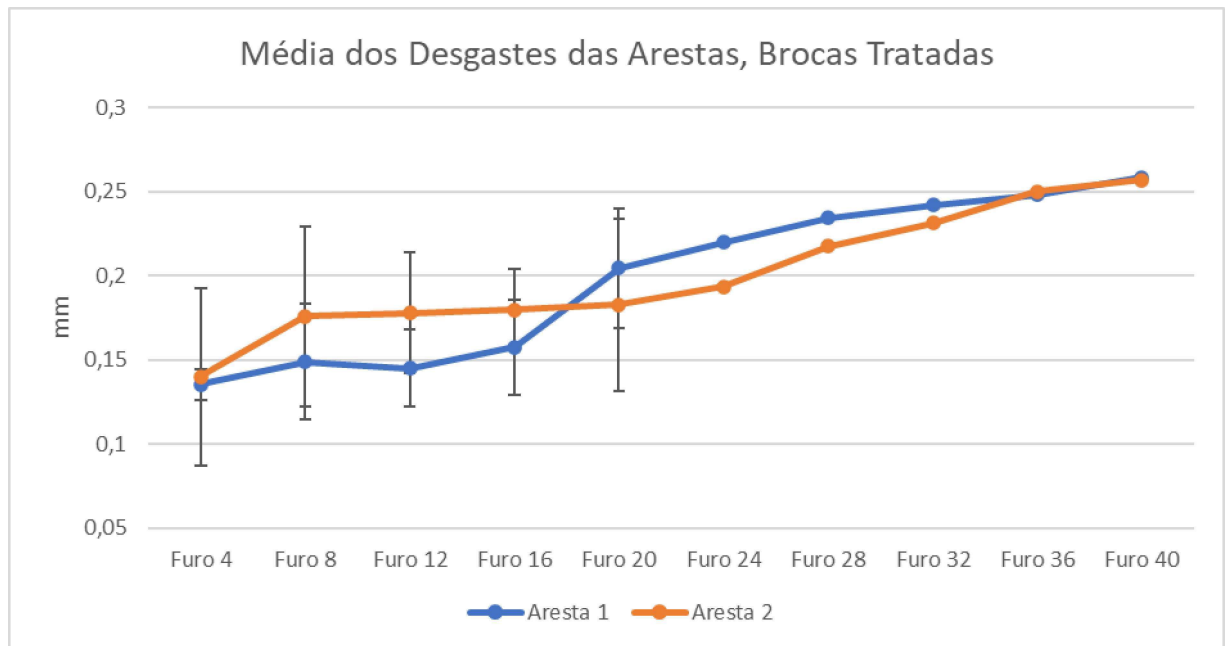
Fonte: Autoria própria, 2025

A análise das imagens evidencia desgastes severos, com formação de rebarbas, microfraturas e perda significativa de material na zona de contato, o que indica desgaste progressivo por atrito, intensificado pela ausência de lubrificação durante a usinagem. A simetria do desgaste nas duas arestas sugere que as condições de corte foram suficientemente severas para afetar ativamente ambas as regiões.

Além disso, o padrão de desgaste e a degradação da aresta de corte reforçam a vulnerabilidade de ferramentas não tratadas com condicionador de metais, especialmente em processos contínuos de furação profunda sem fluido refrigerante. Esse comportamento contrasta com o desempenho das brocas tratadas, as quais apresentaram desgaste significativamente inferior ao longo dos mesmos ciclos de furação, conforme discutido posteriormente.

Dessa forma, ao analisar o comportamento das brocas não tratadas, ficou evidente a limitação de sua vida útil e o desgaste acentuado ao longo das furações, especialmente em função da ausência de lubrificação. Com o intuito de verificar a eficácia do tratamento com condicionador de metais como alternativa para mitigar esses efeitos, foram realizados ensaios sob as mesmas condições operacionais com brocas previamente tratadas. No Gráfico 2 e Tabela 3 são apresentados os valores médios dos desgastes nas arestas 1 e 2 das brocas que foram submetidas ao tratamento com condicionador de metais.

Gráfico 2: Desgaste das brocas tratadas



Fonte: Autoria própria, 2025

Tabela 3: Desgaste médio das arestas de corte das brocas tratadas, 20 primeiros furos

	Furo 4	Furo 8	Furo 12	Furo 16	Furo 20
Aresta 1	0,135 mm	0,149 mm	0,145 mm	0,157 mm	0,204 mm
Aresta 2	0,140mm	0,176 mm	0,178 mm	0,180 mm	0,183 mm

Fonte: Autoria própria, 2025

As medições foram realizadas a cada quatro furos, totalizando vinte por broca, sem que nenhuma delas apresentasse falha ou atingisse desgastes severos, critério definido como fim de vida útil. Essa durabilidade superior permitiu a continuidade dos testes por mais ciclos de furação em comparação com as brocas não tratadas.

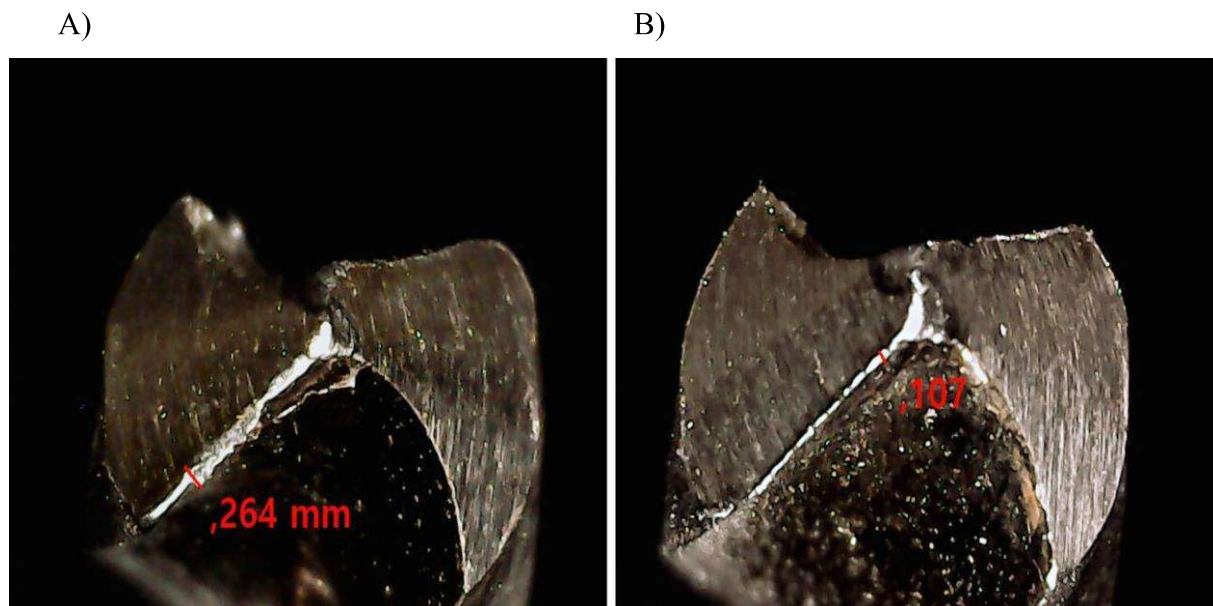
Observa-se que a média dos desgastes ao longo do processo de furação mantiveram-se relativamente baixos e estáveis, principalmente na aresta 1, cujo desgaste médio variou de 0,135 mm para furo quatro a 0,204 mm furo vinte. Já a aresta 2 apresentou uma variação ainda menor, de 0,140 mm na media do furo quatro para 0,183 mm na media do furo 20, como mostrado na Tabela 3.

Comparativamente, os níveis de desgaste das brocas tratadas são inferiores aos observados nas brocas não tratadas, evidenciando a eficácia do condicionador de metais na redução do atrito e, consequentemente, do desgaste nas ferramentas de corte. Além disso, o

fato de nenhuma das brocas tratadas ter atingido desgastes severos até o vigésimo furo reforça a contribuição do tratamento para o aumento da vida útil das ferramentas.

Analisando individualmente o desempenho das brocas tratadas, observa-se que o maior valor de desgaste registrado nos 20 primeiros furos foi de 0,264 mm, observado na broca 2. Por outro lado, o menor desgaste foi de 0,107 mm, correspondente à broca 1. Esses resultados, ilustrados na Figura 13, evidenciam a variação entre as ferramentas tratadas, embora todas tenham mantido níveis de desgaste significativamente inferiores aos das brocas não tratadas.

Figura 13: Brocas pós-tratamento. A) Maior desgaste. B) Menor desgaste

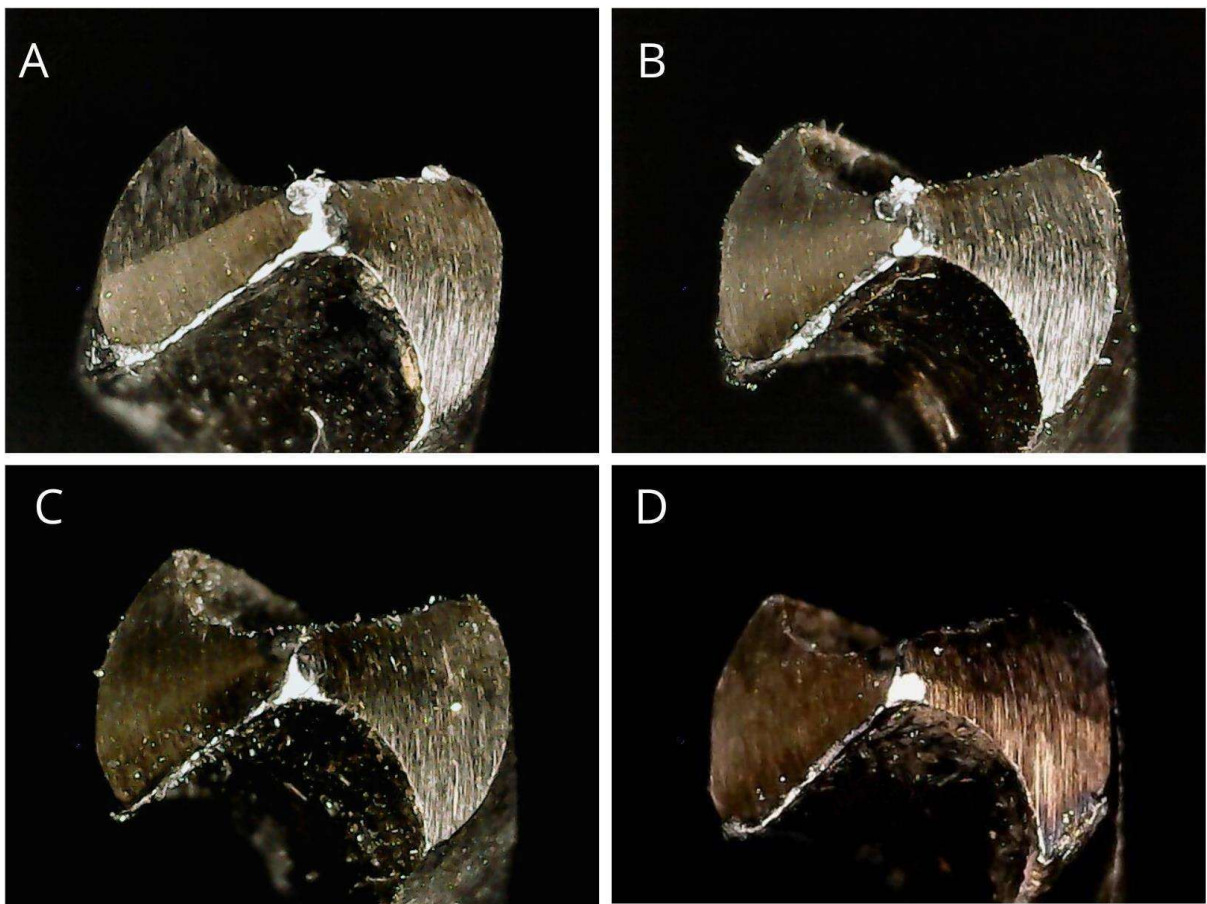


Fonte: Autoria própria, 2025

Diante dos resultados obtidos nos primeiros ciclos de furação, observou-se que nenhuma das brocas tratadas atingiu desgaste de flanco elevado. Essa condição indica que as ferramentas ainda apresentavam capacidade funcional, permitindo a continuidade dos ensaios. A extensão do número de furos torna-se, portanto, fundamental para avaliar o comportamento do desgaste ao longo do tempo e possibilitar uma comparação mais robusta entre as condições testadas. Além disso, a continuidade do experimento permite verificar a durabilidade real das brocas sob uso prolongado em regime de usinagem a seco, ampliando a compreensão sobre a eficiência do tratamento com condicionador de metais.

Os ensaios com as brocas tratadas foram conduzidos até o furo quarenta, nenhuma das brocas atingiu o critério de fim de vida útil adotado como desgaste severo. A Figura 14 apresenta o estado final de cada broca após a realização quarenta furos, das brocas 1, 2, 3 e 4.

Figura 14: Brocas tratadas no furo quarenta. A) Broca 1. B) Broca 2. C) Broca 3. D) Broca 4



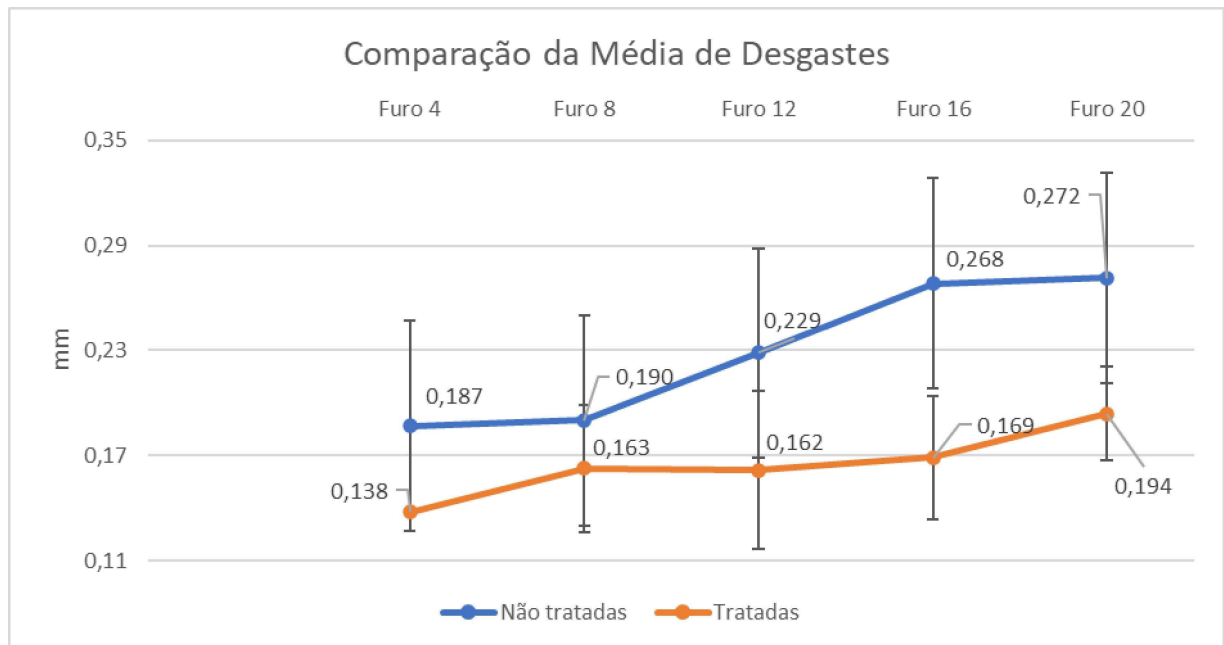
Fonte: Autoria própria, 2025

Esses resultados corroboram os dados quantitativos apresentados anteriormente, reforçando a eficácia do tratamento com condicionadores de metais na redução do desgaste e prolongamento da vida útil das ferramentas. Além disso, houve a ausência de falhas graves, como fraturas ou colapsos estruturais, nas brocas tratadas levando a sugerir que o condicionador de metais foi adsorvido efetivamente.

Após a análise das medias das brocas ao longo dos vinte primeiros furos para as brocas tratadas e não tratadas, torna-se relevante observar o comportamento da média das medias destes vinte primeiros furos. Essa comparação permite comparar como ocorreram os desgastes das brocas tratadas e não tratadas ao longo dos vinte furos, mostrando

evidentemente que as brocas tratadas apresentaram valores menores de desgaste de flanco em comparação as brocas não tratadas, comparação mostrada no Gráfico 3.

Gráfico 3: Comparação das médias, brocas tratadas e não tratadas



Fonte: Autoria própria, 2025

O Gráfico 3 apresenta a comparação entre as médias dos desgastes das arestas das brocas tratadas e não tratadas ao longo dos 20 furos realizados durante os ensaios. Observa-se que, desde os primeiros furos, as brocas que não passaram pelo tratamento com condicionador de metais já apresentavam valores médios de desgaste superiores em relação às tratadas.

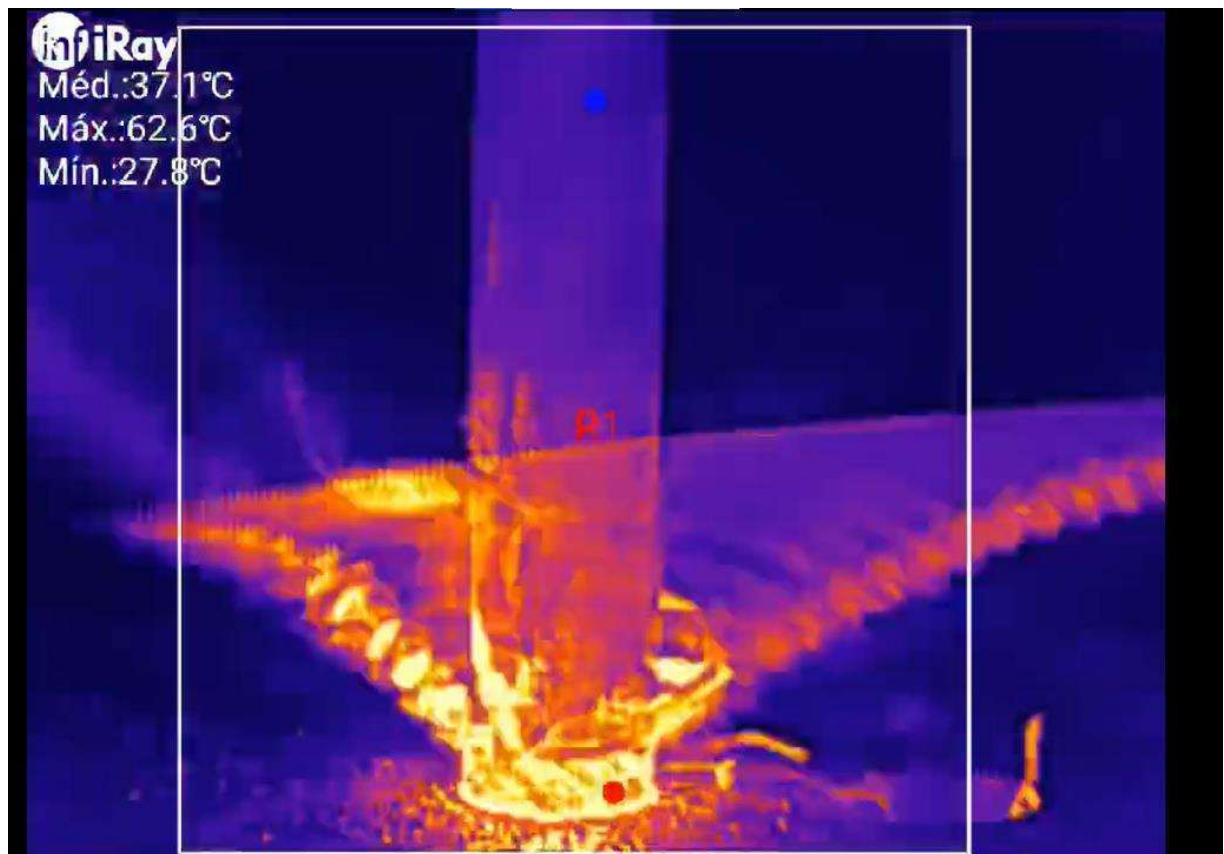
Essa diferença se torna mais evidente a partir do furo 12, ponto em que as brocas não tratadas passam a apresentar um aumento mais acentuado no desgaste, atingindo um valor médio de 0,268 mm no furo 16, enquanto as tratadas apresentaram apenas 0,168 mm no mesmo ponto. Mesmo no furo 20, em que nenhuma das brocas tratadas atingiu o fim de vida, a média do desgaste manteve-se inferior à das não tratadas, o que reforça a eficácia do tratamento na redução do desgaste progressivo. Essa diferença consistente indica que o tratamento com o condicionador de metais contribuiu para maior estabilidade no desempenho das ferramentas ao longo do tempo, refletindo em maior vida útil e menor variação de desgaste entre as arestas avaliadas.

Além da análise do desgaste de flanco nas ferramentas, a temperatura gerada na zona de corte constitui um parâmetro crítico para a avaliação do desempenho das brocas, especialmente em condições de usinagem a seco. O aumento da temperatura influencia

diretamente o comportamento tribológico entre a ferramenta e a peça, podendo acelerar o desgaste e comprometer a integridade da aresta de corte. Nesse contexto, foi realizada a medição da temperatura superficial das brocas durante os ensaios, utilizando uma câmera termográfica, com o objetivo de comparar os efeitos térmicos entre as brocas tratadas com condicionador de metais e as não tratadas.

A imagem termográfica a seguir, Figura 13, ilustra a distribuição de temperatura durante o processo de furação, mostrando no canto superior esquerdo as temperaturas médias, máximas e mínimas na broca 2 furo 20. Ressalta-se, mais uma vez, que os valores de temperatura apresentados foram obtidos por meio da radiação infravermelha captada pelo equipamento, não correspondendo exatamente às temperaturas reais na região de corte.

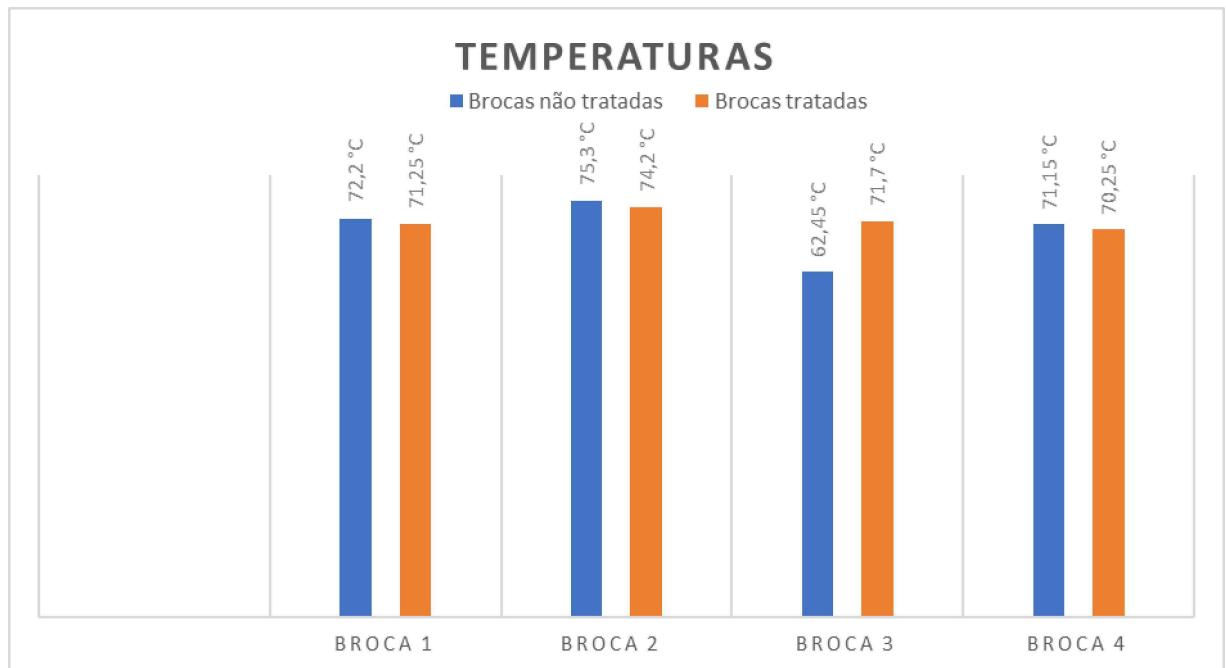
Figura 15: Imagem térmica



Fonte: Autoria própria, 2025

O Gráfico 4 analisa a temperatura média das brocas tratadas e não tratadas ao longo das furações, sendo medidas ao longo dos primeiros e últimos furos.

Gráfico 4: Média das temperaturas



Fonte: Autoria própria, 2025

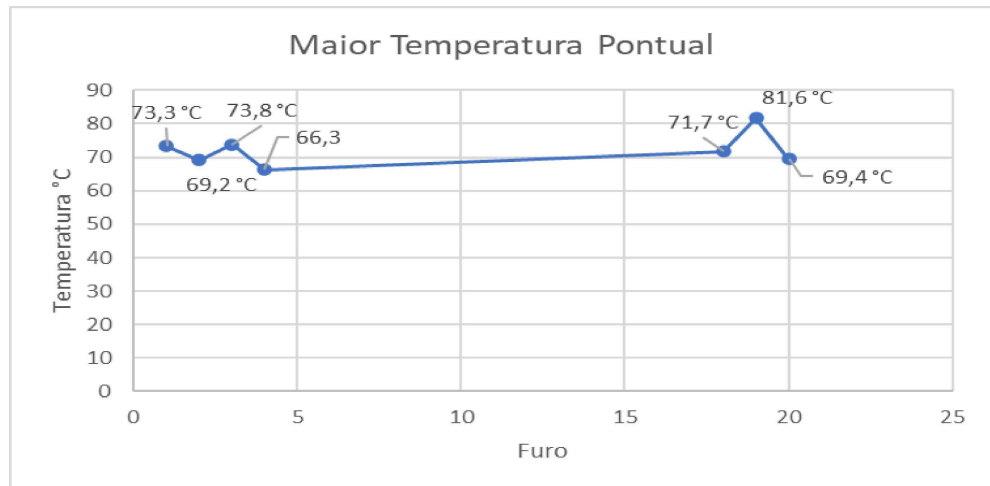
O Gráfico apresenta a comparação entre as temperaturas médias registradas nas brocas tratadas com condicionador de metais e nas brocas não tratadas, longo dos primeiros e últimos furos. De forma geral, observa-se que as brocas tratadas mantiveram temperaturas ligeiramente superiores ou muito próximas às das não tratadas ao longo da maioria das medições, como é visto na broca 1 trada e broca 4 não tratada, onde sua média de temperatura se manteve muito semelhante.

Adicionalmente, mesmo que a temperatura média não tenha sido significativamente inferior nas brocas tratadas, os menores desgastes observados nessas ferramentas indicam que a lubrificação promovida pelo condicionador foi eficiente na proteção das arestas de corte, mesmo sob temperaturas elevadas. Portanto, os dados térmicos reforçam a hipótese de que o condicionador de metais não promove a redução da temperatura durante o processo, uma vez que sua função não é a de atuar como fluido refrigerante.

De modo geral, a oscilação térmica observada nas brocas não tratadas, especialmente na broca 3, reforça o comportamento menos previsível e menos eficiente dessas ferramentas quando submetidas à usinagem a seco, sem a presença de lubrificantes ou tratamentos superficiais.

A temperatura pontual mais elevada registrada entre as brocas tratadas com o condicionador de metais Militec-1 foi de 81,6 °C, observada no furo 19 da broca 3, a distribuição pontual de temperatura ao longo desta broca é mostrada no Gráfico 5.

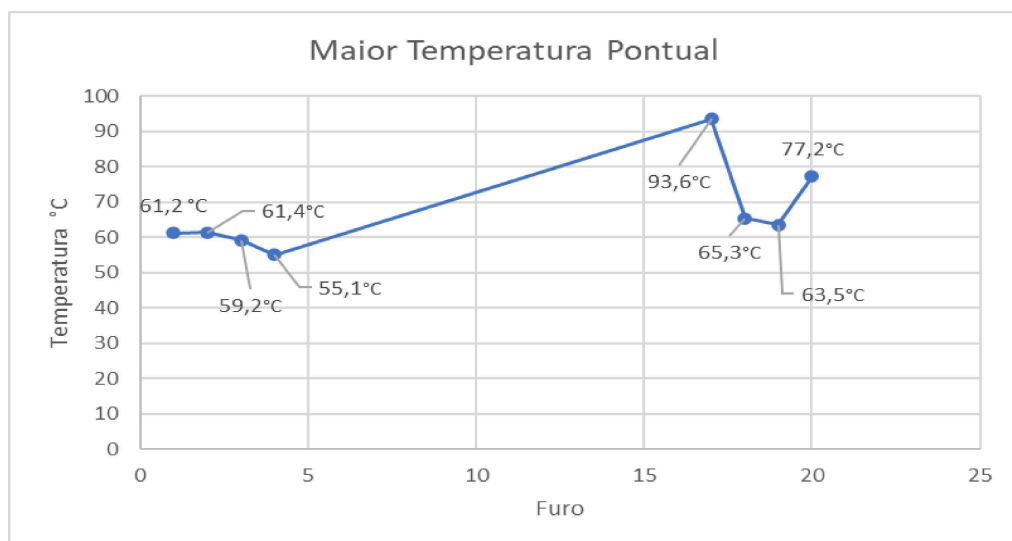
Gráfico 5: Brocas tratadas



Fonte: Autoria propria, 2025

Embora esse valor represente o pico térmico entre as ferramentas tratadas, ainda permanece inferior à maior temperatura registrada entre as brocas não tratadas, que atingiu 93,6 °C, no furo 17 broca 3. A distribuição pontual de temperatura nesta broca é mostrada no Gráfico 6.

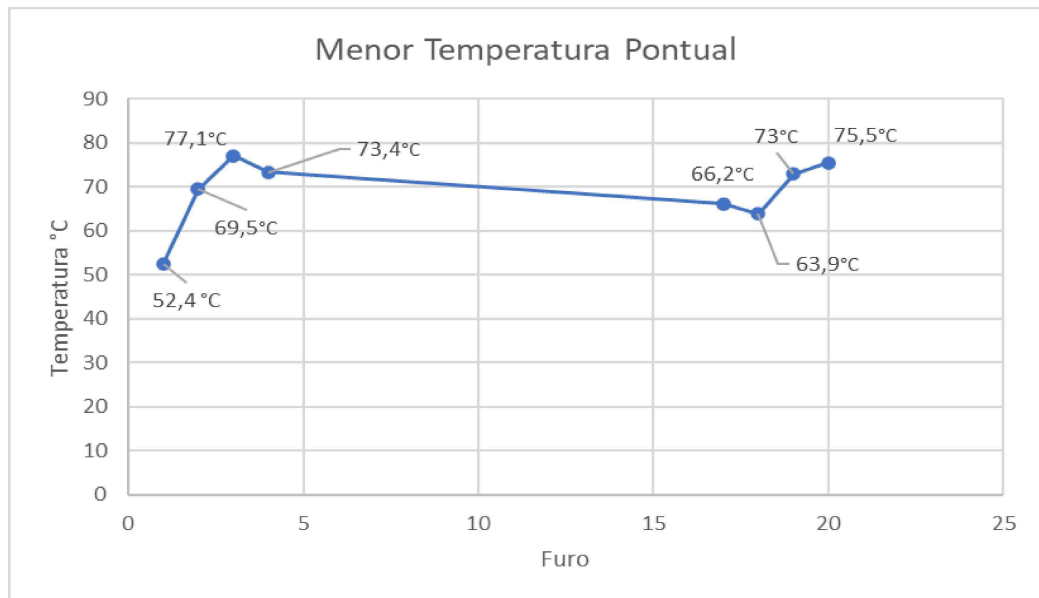
Gráfico 6: Brocas sem tratamento



Fonte: Autoria propria, 2025

Por outro lado, a menor temperatura pontual verificada entre as brocas tratadas foi de 52,4 °C, no furo 1 da broca 1, como mostrado no Gráfico 7.

Gráfico 7: Broca tratada



Fonte: Autoria propria, 2025.

Enquanto nas brocas não tratadas o menor valor foi de 55,1 °C visto na broca 3, furo 4, como mostrado no Gráfico 6. Esses dados indicam que, apesar de pequenas variações, os valores de temperatura entre os dois grupos de ferramentas se mantêm relativamente próximos, tanto em relação às médias quanto aos valores pontuais. Isso sugere que o condicionador de metais não exerce influência significativa sobre a dissipação térmica durante o processo de furação.

Dessa forma, os resultados reforçam a ideia de que o condicionador de metais não atua como fluido refrigerante. Sua função principal não é reduzir a temperatura do processo, mas sim minimizar o atrito e o desgaste entre as superfícies em contato. A semelhança entre os comportamentos térmicos das brocas tratadas e não tratadas sustenta essa conclusão.

6. CONCLUSÃO

Podemos concluir que o uso de condicionadores de metais contribui significativamente para aumentar a vida útil das brocas de aço rápido (HSS) em furações de pequenos diâmetros. Os desgastes observados nas brocas tratadas foram consideravelmente menores em comparação com as brocas não tratadas. O tratamento por adsorção demonstrou ser eficaz, pois a redução na massa do condicionador correlaciona-se diretamente com o aumento da massa das brocas tratadas, indicando a formação de uma película protetora sobre as ferramentas. Os ensaios de usinagem foram satisfatórios, evidenciando uma clara diferença nos resultados de desgaste e comprovando que os parâmetros de corte utilizados foram adequados. Além disso, as brocas tratadas ainda tinham capacidade para realizar mais furos antes de atingir o limite de desgaste estabelecido para o trabalho. Embora os ensaios com as brocas tratadas tenham sido concluídos após a execução dos 40 furos estipulados, o tratamento proporcionou um aumento de aproximadamente duas vezes e meia na vida útil das brocas. A análise das temperaturas demonstrou que o condicionador de metais não atua como um fluido refrigerante eficiente, uma vez que as temperaturas registradas nos dois grupos de amostras permaneceram semelhantes. Contudo, o condicionador se mostrou um excelente agente lubrificante, reduzindo o atrito e, conseqüentemente, evitando o desgaste severo nas brocas tratadas.

REFERÊNCIAS

- AGAPIOU, J.; STEPHENSON, D.A. **Cutting Tool Wear and Failure Mechanisms**. Boston, MA: Springer US, 2013.
- ALLY, P. R. de S. de O. **Avaliação tribológica de condicionadores de metais comerciais por meio do ensaio pino-disco**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Natal, 2022.
- ANTONELLO, R. T. **Preparação de Aços Rápidos ao Molibdênio com Adição de Carboneto de Nióbio Através de Técnicas de Metalurgia do Pó**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.
- ARAUJO, A.C.; MOUGO, A.L.; CAMPOS, F.O. **Usinagem para Engenharia: Um Curso de Mecânica do Corte**. 2020. 1ª edição. São Paulo.
- ARIF, R; FROMENTIN, G; ROSSI, F; MARCON, B. **Investigations on drilling performance of high resistant austenitic stainless steel**. Journal Of Manufacturing Processes, v. 56, n. Parte A, p. 856-866, 2020. Elsevier BV.
- CALABOKIS, O. P.; NUÑEZ R., YAMID, E.; BALLESTERO, V.; BORGES, P. C.; COUSSEAU, T. **Effect of an Aftermarket Additive in Powertrain Wear and Fuel Consumption of Small-Capacity Motorcycles: A Lab and Field Study**. MDPI – Lubricants, v. 10 (7), 143, 6 July 2022.
- CALABOKIS, O. P. **Estudo das propriedades físico-químicas e tribológicas de condicionadores de metais e suas misturas com óleos lubrificantes para motor**. 2024. Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024.
- CARRETEIRO, R. P.; BELMIRO, P. N. A. **Lubrificantes e lubrificação industrial**. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda., 2006. 504 p.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 4ª ed. São Paulo: ABM, 1979.
- COSTA, A. F. DA. **Análise comparativa de ferramentas revestidas por PVD e CVD no torneamento do aço ABNT 8620**. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.
- COSTA, E. S. **Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte-MQF**. 2004. 311 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- OLIVEIRA, C. A. M. et al. Estudo das propriedades tribológicas de condicionadores de metais. Colloquium Exactarum, v. 6, n. 2, p. 35–42, 2014.
- OLIVEIRA, F.S.; BAPTISTA, E.A.; PEREIRA, F.H.; COPPINI, N.L.; FERREIRA, S.S. **Avaliação de Desempenho Econômico da Aplicação de um Condicionador Metálico em Machos de Corte no Processo de Rosqueamento Interno**. São Paulo, 2014.

DIAS, N.B. **Comparação de Desgastes em Ferramentas de Cortes Tratadas e não Tratadas com Condicionadores de Metais**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; CAPPINI, N.L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artliber. 2013. 8ª edição. São Paulo.

FRACARO, Janaina. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. 1ª ed. Curitiba: Intersaberes, 2017.

FORTES, R. O.; STELLE, L. P. **Influência da lubrificação mínima (MQL) no processo de usinagem: uma revisão sistemática**. São Paulo, 2020.

GUNDA, R. K.; REDDY, N. S. K.; KISHAWY, H. A. **A novel technique to achieve sustainable machining system**. Procedia CIRP, v. 40, p. 30–34, 2016.

HEISEL, U.; LÜCKE, M.; WEINERT, K. **Minimal Quantity Lubrication (MQL) – A new approach in metal cutting**. 1998.

ISHFAQ, K.; ANJUM, I.; PRUNCU, C.I.; AMJAD, M.; KUMAR, M.S.; MAQSOOD, M.A. **Progressing towards Sustainable Machining of Steels: A Detailed Review**. Materials, 2021, 14, 5162.

KATO, K.; ADACHI, K. **Wear Mechanisms**, In: MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK. Ed. CRC Press LLC, Vol. 2, Cap. 22, 2001.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1, Cutting**. Berlin: Springer-Verlag, 2011.

KUMAR, S.; SINGH, R.; GUPTA, P. **Comparative study of cutting tool materials: High-speed steel, carbide, and ceramic tools**. Journal of Manufacturing Processes, 2020.

MACHADO, A.R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2ª ed. rev. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. da. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2015.

MALHEIROS, F.C.N. **Micro-abrasão em DLC Depositado em Borracha**. Vitoria. 2013.

MARQUES, A. da S. **Torneamento de Inconel 718 com aplicação de lubrificantes sólidos**. 2015. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

MEDEIROS, S. D. F. **Análise tribológica de um sistema de acionamento alternativo de pigs para a indústria do petróleo**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

OLIVEIRA, F. S. de; BAPTISTA, E. A.; COPPINI, N. L. **Threading with male machine treated with metallic conditioner [Rosqueamento com machos máquina tratados com condicionador metálico]**. Espacios, 2017.

OLIVEIRA, J. F. G.; ALVES, S. M. **Usinagem ecologicamente correta: uma abordagem para a redução do uso de fluidos de corte.** Revista Máquinas e Metais, São Paulo, n. 483, p. 74–85, 2007.

RIBEIRO, M. V. **Aplicação da técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) em operações de usinagem.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

ROSA, J. B. D.; LOPES, W.; MAGALHÃES, A. S.; CORRÊA, E. C. S.; BRAGA, C.; LOURENÇO, P. P. C. **Influência dos parâmetros de têmpera e revenimento sobre a dureza e a microestrutura do aço AISI M2.** Anais do 72º Congresso Anual da ABM – Internacional e 17º ENEMET – ABM Week, São Paulo: ABM, 2017, p. 1697–1704

ROSSO, Davi Costa. **Avaliação tribológica de condicionadores de metais comerciais por meio do ensaio pino disco.** Centro Universitário SATC, Criciúma, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso.

ROSSO, L.S.; COSTA, A.L. **Estudo da Eficiência de Condicionadores de Metais em Comparação a um Óleo Lubrificante no Desgaste de um Aço SAE 1045.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – SATC.

SEMBARSKI, P. R. B. **Influência do tipo de lubrificação no desgaste por deslizamento de metais.** 2018. Graduação – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul.

SERRA, P. L. C. et al. **Estudo de nitretação a plasma e tratamento duplex em brocas de aço rápido.** Revista Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, p. e-12772, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200002.1072.

DA SILVA, E. N.; **Viabilidade econômica em processos de rosqueamento utilizando machos de roscar com condicionador metálico.** 2014. Dissertação de Mestrado – Universidade Nove de Julho, São Paulo.

SOUZA, A. J. **Processos de Fabricação por Usinagem.** DEMEC-UFRGS, Apostila, 2016.

SOUZA, G. A. de et al. **Avaliação do desempenho de insertos de metal duro tratados com condicionador de metais no torneamento do aço SAE 1045.** CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica, 2019.

SUBHEDAR, D. G.; PATEL, Y. S.; RAMANI, B. M.; PATANGE, G. S. **An experimental investigation on the effect of Al₂O₃/ cutting oil based nano coolant for Minimum Quantity Lubrication drilling of SS 304.** Cleaner Engineering And Technology, v. 3, n. 1, p. 1–7, 2021. Elsevier BV.

DALEFFE, A.; TEIXEIRA, G. dos S. **Desempenho e vida útil de brocas helicoidais de aço rápido no processo de furação em ferro fundido nodular GGG50.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia – Engenharia Mecânica) – Centro Universitário SATC, Criciúma, 2021

TSCHÄTSCH, H. **Applied Machining Technology.** Springer, 8ª ed., 2009.

VAZ, G. S. **Estudo comparativo da vida da broca na furação do aço inoxidável superaustenítico 904l com a aplicação de nanofluido à base de grafeno multicamadas e com fluido em abundância.** Monografia (Engenharia Mecânica) – Porto Alegre, 2022.

VILANOVA, A. M.; VAZ, G. S.; SOUZA, A. J.; PASSARI, É. S. **Comparative study of drilling super austenitic stainless steel with external applications of reduced quantity nanofluid and flooded bio-lubricant.** Materials Today: Proceedings, p. 1–9, 2023. Elsevier BV.

WANG, Z.; SUN, J.; LIU, J.; LV, K.; SHAO, Z.; ZHANG, X.; XU, Z.; DAI, Z.; HUANG, N. **Synthesis and mechanism of environmentally friendly high temperature and high salt resistant lubricants.** Petroleum Science, v. 20, n. 5, p. 3110–3118, 2023. Elsevier BV.

ZEILMANN, R. P.; SANTIN, R.; FINIMUNDI, A. V. **Efeito de diferentes condições de aplicação de fluidos lubri-refrigerantes no desgaste de brocas de aço-rápido.** 2006.

ZMITROWICZ, A. **Wear patterns and laws of wear: A review.** Journal Of Theoretical And Applied Mechanics, Gdańsk, v. 44, n. 2, p. 219–253, nov. 2006.