

Análise do desgaste em ferramentas de metal duro revestidas com TiN durante o fresamento do aço ABNT 4140 a seco e com fluido sintético

Nilo Nogueira da Silva ^{1*} Marcelo Ferreira ² Wagner Sade ² 

Resumo

A indústria metalmecânica exige cada vez mais o desenvolvimento dos processos de fabricação, especialmente a modernização das máquinas operatrizes e a evolução constante das ferramentas de corte. O presente trabalho avalia a influência dos parâmetros de corte no processo de fresamento do aço ABNT 4140, utilizando fluido sintético e corte a seco, no desgaste da ferramenta de corte revestida com TiN. Dessa forma, barras do aço ABNT 4140 foram fresadas utilizando uma velocidade de corte de 120 m/min e diferentes avanços. A avaliação do desgaste de flanco das ferramentas foi realizada nas três posições das pastilhas na fresa, sendo quantificada por microscopia óptica e observada em microscópio eletrônico de varredura, com o intuito de verificar os mecanismos de desgaste. Investigou-se a influência do desgaste de flanco das pastilhas superior a 0,3 mm, o que pode permitir maior utilização da pastilha no fresamento de acabamento superficial da peça. Assim, concluiu-se que a refrigeração interna feita por furo passante na fresa não se mostrou superior ao corte a seco e, também, que o desgaste foi sensível ao avanço.

Palavras-chave: Ferramenta de corte revestida TiN; Desgaste de ferramenta de corte; Fluidos de corte.

Analysis of wear in carbide tools coated with TiN during the milling of ABNT 4140 steel dry and with synthetic fluid

Abstract

The metalworking industry is increasingly demanding the development of manufacturing processes, particularly the modernization of machine tools and the constant evolution of cutting tools. This study evaluates the influence of cutting parameters in the milling process of ABNT 4140 steel, using synthetic fluid and dry cutting, on the wear of the TiN-coated cutting tool. Bars of ABNT 4140 steel were milled using a cutting speed of 120 m/min and different feed rates. The evaluation of tool flank wear was conducted at three positions of the inserts in the milling cutter, quantified by optical microscopy and observed with a scanning electron microscope to verify the wear mechanisms. The influence of flank wears greater than 0.3 mm was investigated, as this may allow the insert to be used more effectively for milling the surface finish of the workpiece. It was concluded that internal cooling through a through-hole in the cutter was not superior to dry cutting, and that wear was sensitive to the feed rate.

Keywords: TiN coated cutting tool; Cutting tool wear; Cutting fluids.

1 Introdução

Na indústria manufatureira moderna, a competitividade está diretamente relacionada à produção eficiente, com alta qualidade e baixo custo. Aumentar a produtividade implica em reduzir o tempo de usinagem e minimizar o tempo de inatividade das máquinas. Estima-se que os custos de uma máquina ociosa sejam semelhantes aos de uma máquina em

operação. Uma das causas de paradas não planejadas é a substituição prematura das ferramentas de corte devido ao desgaste acelerado. Aumentar a vida útil das ferramentas significa não apenas otimizar a produção, mas também entender melhor os mecanismos de desgaste que afetam seu desempenho durante o corte [1,2].

¹Powermig Robótica e Soldagem, A Lincoln Electric Company, Caxias do Sul, RS, Brasil.

²Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

*Autor correspondente: nilons.fisica@gmail.com

E-mails: marcelof@cefetmg.br; wagnersade@hotmail.com



Tabela 1. Composição química do aço ABNT 4140 (% em peso)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Sn	V	N
0,39	0,8	0,2	0,013	0,016	0,91	0,02	0,16	0,009	0,1	0,009	0,005	0,0066

Embora o desgaste das ferramentas seja um fenômeno inevitável no processo de usinagem, ele compromete a precisão e a qualidade das peças. Uma ferramenta desgastada pode resultar em falhas catastróficas se não for monitorada adequadamente [3-6]. O desenvolvimento de ferramentas revestidas com multicamadas de materiais, como TiN, Ti-Si-N e CrN-TiN, proporcionou maior resistência ao desgaste e uma melhor aderência dos revestimentos externos, além de reduzir a geração de calor na zona de corte [7-16]. Entre esses, o revestimento de nitreto de titânio (TiN) tem sido amplamente utilizado, oferecendo alta dureza, resistência ao desgaste e boa condutividade térmica, o que o torna ideal para ferramentas de corte.

Os revestimentos em ferramentas de corte têm como objetivo principal reduzir o atrito, minimizando o desgaste indireto e possibilitando o uso de velocidades de corte mais elevadas [17-19]. O TiN, por exemplo, prolonga a vida útil da ferramenta ao reduzir a tendência de formação de arestas postiças e minimizar a aderência do cavaco. A dureza e tenacidade dos revestimentos são fatores cruciais na resistência ao desgaste das ferramentas.

Além das ferramentas, os fluidos de corte também desempenham um papel crucial no processo de usinagem, sendo compostos por óleo mineral e aditivos para melhorar o desempenho. Contudo, devido aos impactos ambientais negativos e aos riscos à saúde, há uma busca crescente por alternativas mais sustentáveis, como fluidos de corte “verdes” e técnicas de usinagem a seco ou com mínima quantidade de fluido de corte (MQCF) [20-22]. Em operações de fresamento, o uso de fluido pode ser prejudicial devido às variações de temperatura que ele provoca, o que pode causar trincas na ferramenta [17]. Em função do alto custo e das preocupações ambientais, é crucial avaliar a necessidade real do uso de fluidos de corte [23-25].

Um tipo de desgaste suscetível de ocorrências é o desgaste de entalhe. Na usinagem, refere-se à formação de uma cavidade ou sulco na aresta de corte da ferramenta, geralmente devido a altas temperaturas e tensões mecânicas. Esse tipo de desgaste pode ocorrer no fresamento e afeta a qualidade do acabamento superficial da peça.

Este estudo tem como objetivo analisar o desgaste de uma ferramenta de corte de metal duro revestida com TiN, comparando as condições de corte a seco e com fluido de corte sintético, além de avaliar a rugosidade superficial do aço ABNT 4140 após o fresamento.

2 Materiais e métodos

A matéria-prima utilizada para a avaliação do desgaste da ferramenta durante a fresagem foi o aço ABNT 4140, fornecido na forma de barras com diâmetro de $(100 \pm 1,0)$ mm

Tabela 2. Parâmetros de corte aplicados durante o fresamento

Parâmetros de corte	
vc (m/min)	120
ap (mm)	1,00
	0,05
fz (mm/dente)	0,10
	0,15

e comprimento de 100 mm. Essas barras foram submetidas a tratamento térmico de têmpera e revenimento em forno de martêmpera, com o objetivo de alcançar a mesma dureza do material laminado ($25 \pm 2,0$ HRC). A austenitização foi realizada a 860°C , com manutenção por 1 hora nessa temperatura. Posteriormente, as barras foram resfriadas no forno de martêmpera a 140°C por 20 minutos e, em seguida, ao ar até a temperatura ambiente.

O revenimento foi realizado a 620°C , com tempo de manutenção de 2 horas, seguido de resfriamento no forno até a temperatura ambiente. Após o tratamento térmico, a dureza foi medida na escala HRC.

A composição química do aço está detalhada na Tabela 1.

As operações de fresamento foram realizadas em um centro de usinagem da marca ROMI, modelo Discovery 560. Para os ensaios, utilizou-se uma fresa com diâmetro de 20 mm (montagem e especificação apresentadas na Figura 1), velocidade de corte (vc) de 120 m/min e avanços por dente (fz) de 0,05; 0,10 e 0,15 mm/rev, mantendo a profundidade de corte (ap) constante em 1 mm (Tabela 2). As pastilhas utilizadas eram de metal duro WC-Co P-35, revestidas com TiN, caracterizadas por elevada dureza e baixa tenacidade.

O fluido de corte utilizado foi um sintético diluído em água, na proporção de 8% em volume, com uma vazão constante de 15 L/min. O processo de fresagem foi conduzido em uma configuração de fresamento frontal, onde as arestas cortantes da fresa atuam perpendicularmente à superfície da peça, permitindo um movimento contínuo de avanço e recuo.

O acabamento superficial da peça usinada foi quantificado com um rugosímetro, que foi fixado à mesa da máquina. Após cada dois passes de fresamento, um apalpador foi utilizado sobre a superfície da peça, no sentido do corte (ver Figura 2). O comprimento de amostragem (*cut-off*) adotado foi de 0,80 mm para cada medição.

Após cada dois passes de usinagem, a ferramenta de corte foi inspecionada sob um microscópio específico para medição de desgaste. O fresamento total compreendeu 20 passes, utilizando um dispositivo de fixação que evitou a remoção das pastilhas, prevenindo danos às rosas dos parafusos de fixação. Durante o processo, foi monitorado

o deslocamento radial das pastilhas registrado a cada dois passes, e medido com um relógio comparador, observando-se que a variação máxima foi de 10 μm .

Foi utilizada a norma ISO 3585:1998 [26] que normatiza os desgastes nas ferramentas de corte de aço rápido, metal duro e cerâmica, utilizando-se os parâmetros: $KT = 0,06 + 0,3 f$, sendo f , o avanço em mm/revolução, $VBB = 0,3$ mm, $VB_{\text{max}} = 0,6$ mm usados como critério de vida da ferramenta (Figura 3).

Para a avaliação do desgaste do flanco, a ferramenta foi fixada na base do microscópio, ajustando-se a linha do visor ao zero na escala. A partir desse ponto, a linha foi

deslocada até a maior espessura do desgaste, permitindo calcular a perda. O desgaste do flanco foi analisado nas três posições de fixação das pastilhas, para determinar possíveis variações de desgaste com a posição. Com a velocidade de corte estabelecida em 120 m/min, foram avaliados os desgastes para os avanços de 0,05, 0,10 e 0,15 mm/dente, computando-se a média e a variação do desgaste em três ensaios sob condições de fresamento com fluido de corte. Além disso, as análises foram complementadas com microscopia eletrônica de varredura (MEV), acompanhada por um sistema de energia dispersiva de raios-X (EDS).

A Figura 4 apresenta, de forma resumida, a sequência dos ensaios de fresamento e das análises realizadas neste trabalho.

3 Resultados

Inicialmente, foi medida a espessura do revestimento da ferramenta, e o resultado alcançado foi de $(7 \pm 0,2 \mu\text{m})$. Os resultados obtidos no fresamento com ferramenta revestida por TiN, aplicado por PVD, ou seja, por deposição física de vapor, indicaram que a faixa de espessura adequada se situa entre 6 e 10 μm [27].

Verificou-se que o desgaste seguiu um comportamento típico das curvas de desgaste, com uma fase inicial de desgaste acelerado, caracterizada por lascamentos prematuros da aresta cortante, causados pelos constantes choques sofridos pela ferramenta durante as entradas e saídas da peça, o que é característico do corte intermitente (passos 1 a 4).

Nos passos (4-20), ocorreu a segunda fase, com desgaste menos acentuado e mais uniforme, com exceção de alguns momentos, como o 14º passo da Ferramenta 1 com fluido, onde ocorreu o lascamento prematuro da ferramenta. A maioria das ferramentas utilizadas nos ensaios não atingiu o terceiro estágio da curva de desgaste (desgaste catastrófico),

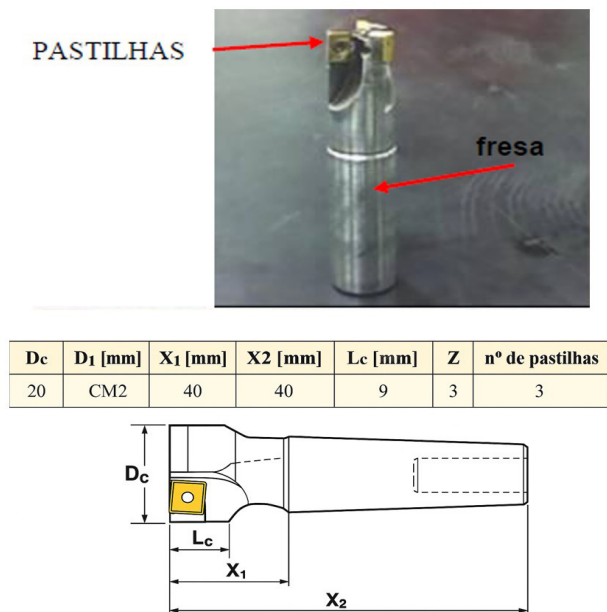


Figura 1. Diagrama de montagem da fresa com pastilhas de corte de 20 mm de diâmetro.

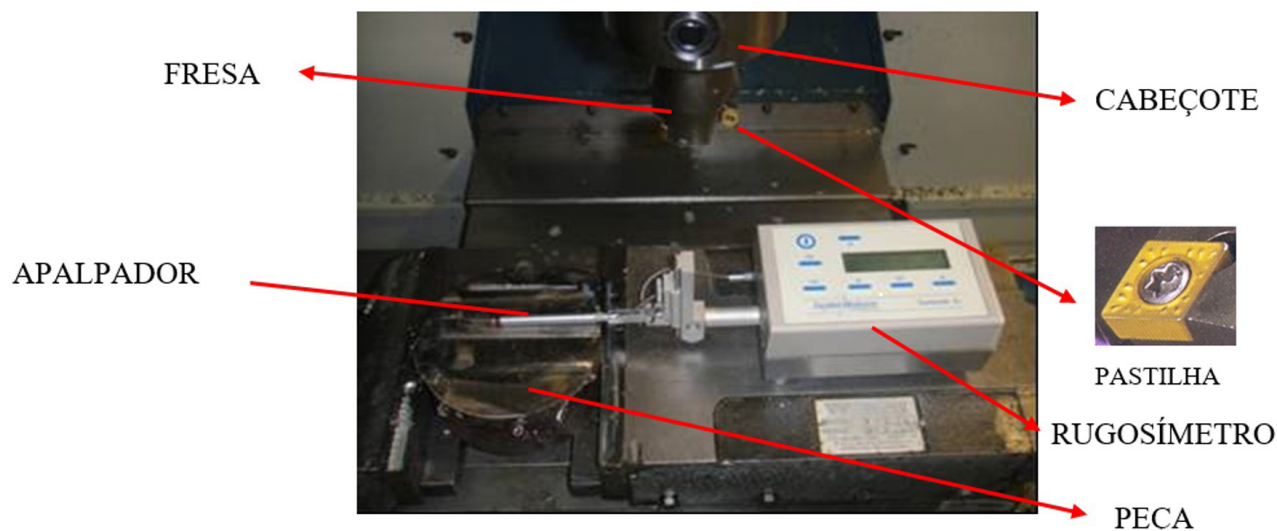


Figura 2. Configuração experimental com disposição do rugosímetro.

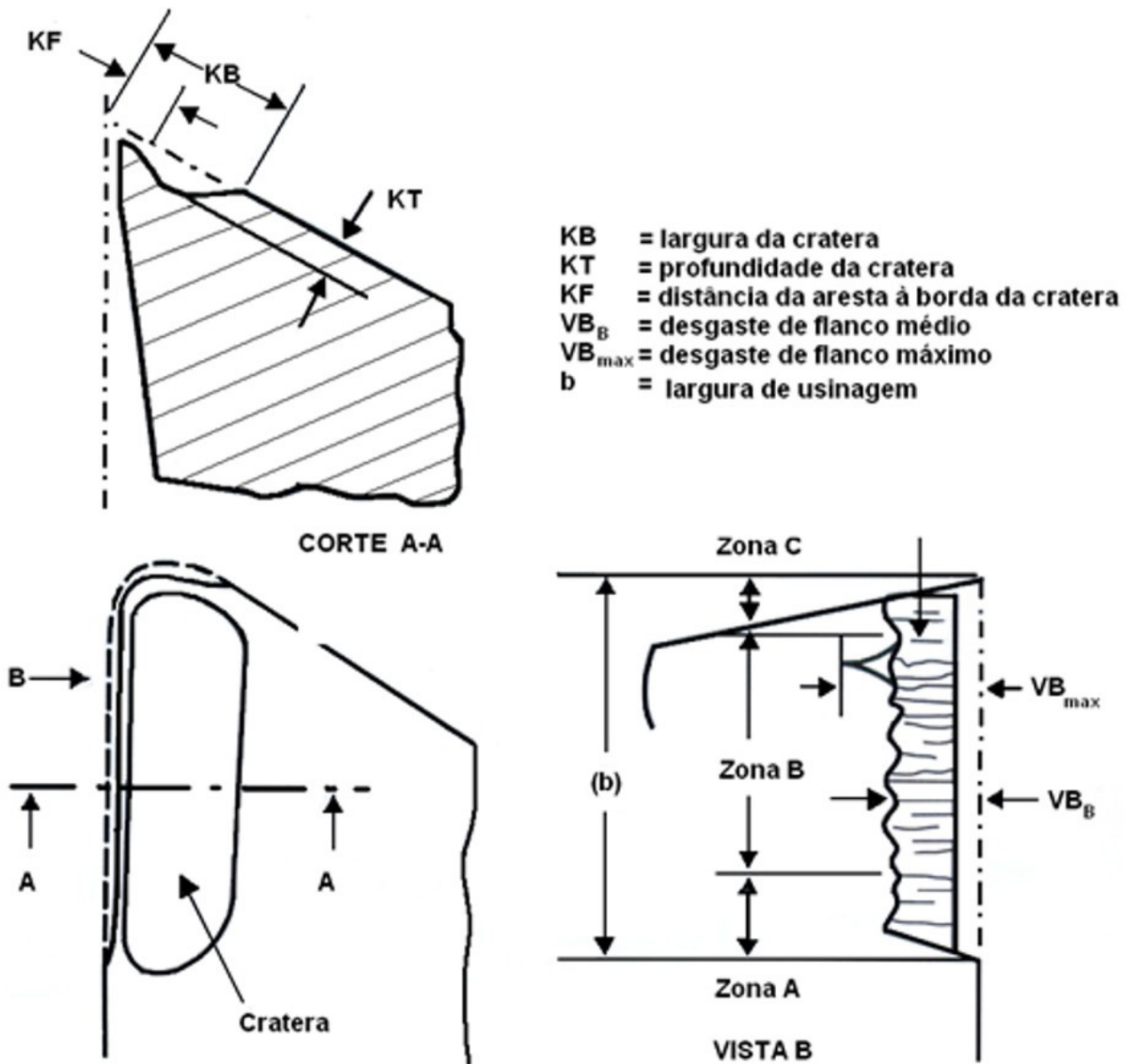


Figura 3. Desgastes e variáveis de medição do desgaste em ferramentas de usinagem.

pois o tempo de duração dos ensaios não foi suficiente para alcançar tais valores.

Verificou-se também que o revestimento da ferramenta foi perdido já no início do ensaio, expondo o substrato às variações de temperatura, especialmente nos testes com refrigeração, onde essa variação tende a ser maior.

A Figura 5 mostra os resultados das curvas de desgaste das Ferramentas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), tanto a seco quanto com fluido refrigerante.

Na Ferramenta 1, observou-se uma alternância na média dos resultados. Em alguns momentos, o desgaste no ensaio com fluido foi maior do que no ensaio a seco, enquanto em outros momentos ocorreu o inverso. No ensaio com fluido, após um início com lascamento da

aresta (passos de 0 a 2), a ferramenta sofreu um novo lascamento (do passo 2 para o 4), entrando, a partir daí, em um regime estável com desgaste progressivo e contínuo até o final do ensaio.

No ensaio a seco, após um início com lascamento da aresta (passos de 0 a 2), a ferramenta sofreu novos lascamentos (passos de 2 a 4, de 4 a 6 e de 8 a 10). Após essa sequência de lascamentos, o desgaste assumiu um regime estável e contínuo até o final do ensaio.

No caso da Ferramenta 2 (Figura 5b), observou-se que, durante todo o experimento, o desgaste no ensaio com fluido foi superior ao do ensaio a seco. Verificou-se também que, ao longo de todo o ensaio com refrigeração, a ferramenta sofreu lascamentos constantes.

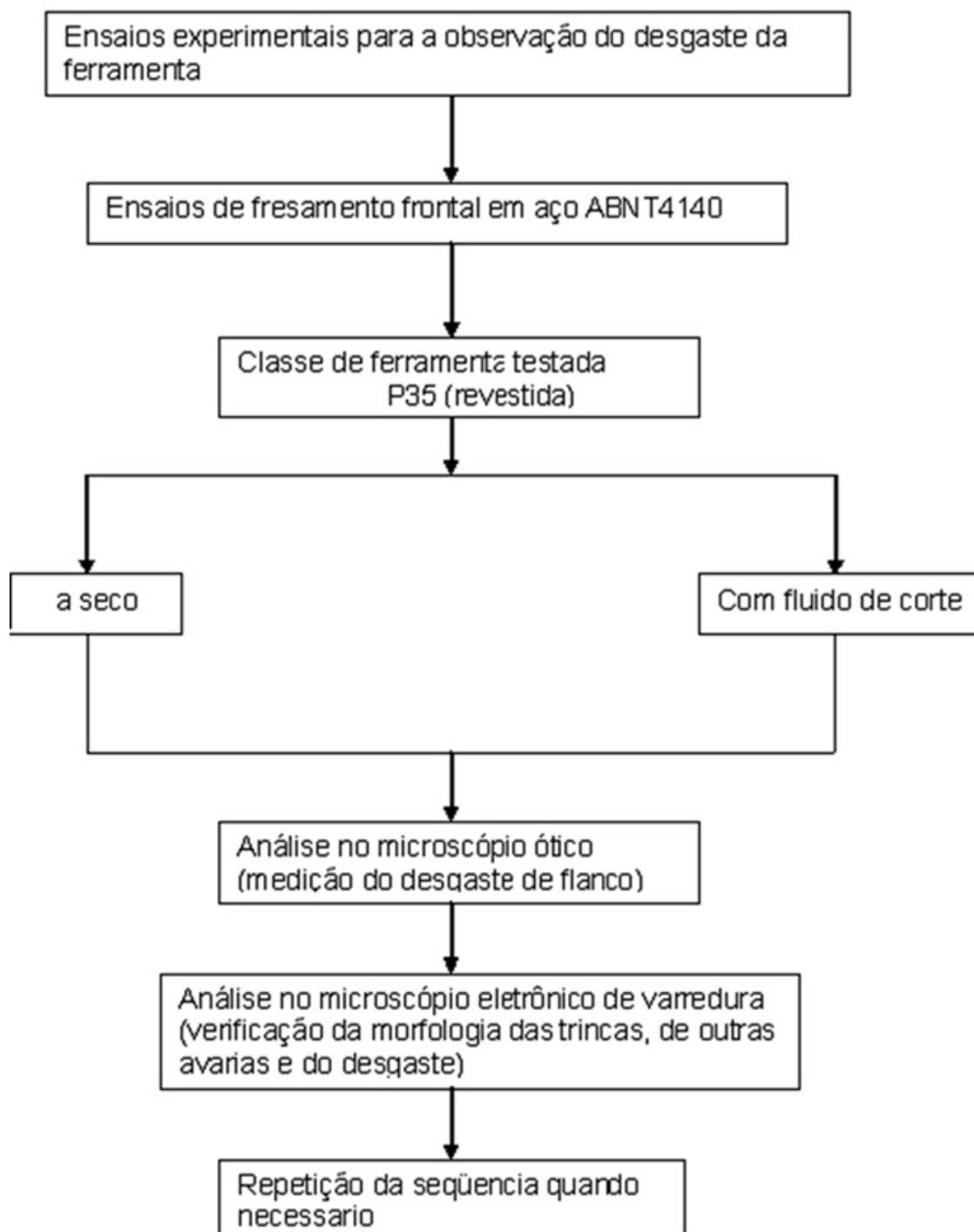


Figura 4. Fluxograma das etapas de fresamento e análises realizadas neste estudo.

O comportamento da Ferramenta 3 foi muito semelhante tanto no ensaio a seco quanto no ensaio com fluido, porém o desgaste foi maior no ensaio com fluido. No ensaio a seco, houve lascamento inicial, do passo 2 para o 4 e do 4 para o 6, seguido por uma fase de estabilidade até o final do ensaio. No ensaio com fluido de corte, os lascamentos foram sequenciais até o passo 10, e a partir daí houve estabilidade até o fim do ensaio.

As Figuras 6 (a) a (f) mostram a sequência de um dos ensaios da Ferramenta 1, com velocidade de corte de 120 m/min, avanço de 0,10 mm/dente e utilizando fluido refrigerante. Pode-se observar que a refrigeração influencia no processo de desgaste, limitando a área da ferramenta que sofre aquecimento.

As Figuras 7 (a) a (c) mostram a sequência de um teste da Ferramenta 1 a seco e os mesmos parâmetros utilizados quanto aplicado o fluido de corte. Observou-se que o aquecimento

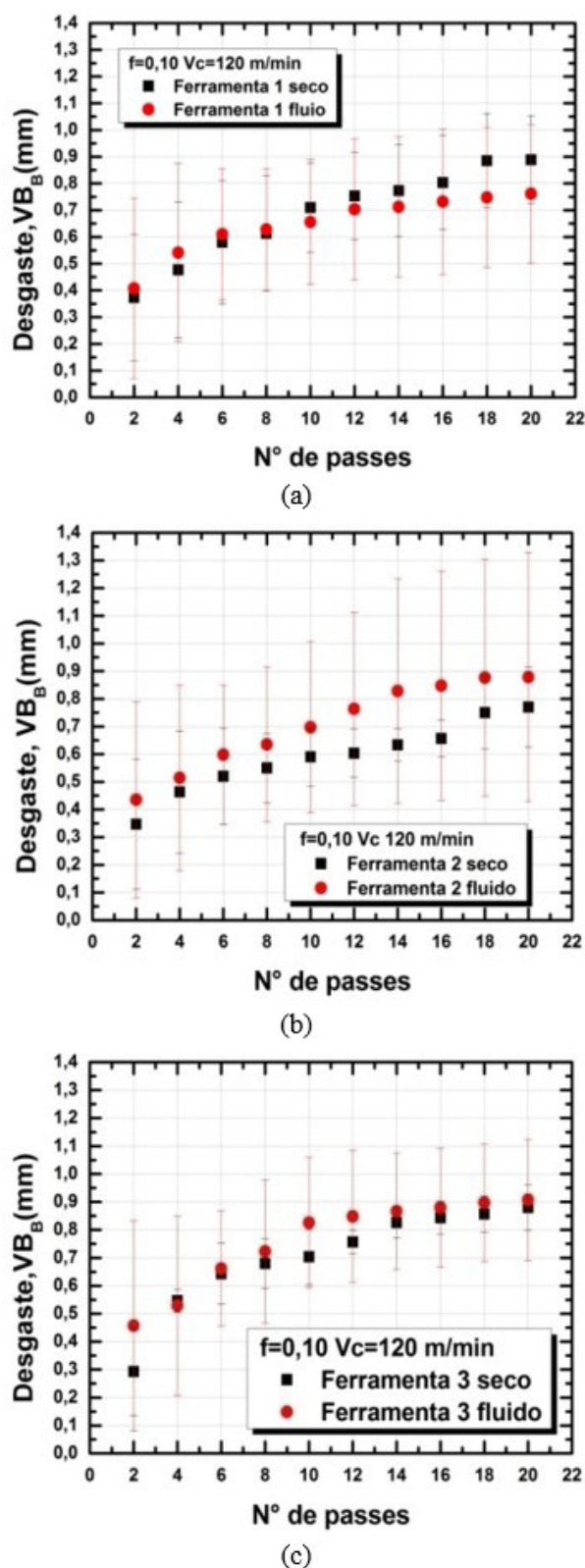


Figura 5. Curvas de evolução do desgaste no ensaio com a seco e com fluido. (a) Ferramenta 1, (b) Ferramenta 2 e (c) Ferramenta 3.

se dá em toda a superfície da ferramenta. Porém, a variação da temperatura (ΔT) é menor que no corte com refrigeração.

Foi identificado que a refrigeração atua como um mitigador do aquecimento na maior parte da ferramenta de corte, limitando-se a aumentar a temperatura apenas na interface entre a ferramenta e o cavaco. No entanto, a utilização do refrigerante resulta em uma maior variação de temperatura (ΔT), o que pode levar ao surgimento de trincas térmicas.

Além disso, foi realizada uma comparação do impacto do avanço no desgaste das ferramentas durante os ensaios realizados em condições de corte a seco e com fluido. Para avanços menores (0,05 mm/dente), observou-se que, na Ferramenta 1, o desgaste sob condições de corte a seco superou o desgaste observado com o uso de fluido refrigerante. Contudo, o desgaste inicial com fluido foi mais acentuado devido ao fenômeno de lascamento. Na Ferramenta 2, após o desgaste inicial em corte seco, o desgaste evoluiu de maneira contínua, sem apresentar lascamentos. Já na Ferramenta 3, não foi possível determinar um padrão claro, com o desgaste variando em diferentes experimentos.

Quando os avanços foram aumentados para 0,15 mm/dente, a relevância do refrigerante se mostrou limitada, alinhando-se com as observações de Vieira e colaboradores [28], assim como de outros autores [29,30], que indicam que a refrigeração pode ser mais prejudicial ao desempenho da ferramenta em cortes intermitentes do que no corte a seco. Também foram considerados os custos e a necessidade de descartar o fluido refrigerante, o que pode inviabilizar seu uso em determinados contextos. Nos experimentos conduzidos por Vieira e colaboradores [28], uma fresa sem refrigeração interna foi utilizada, o que pode explicar a diferença nos resultados em relação ao desempenho do fluido refrigerante neste estudo.

Com base na análise do desgaste, conclui-se que a presença de fluidos de corte não apresentou uma influência significativa na evolução do desgaste das ferramentas.

Essa conclusão se justifica pela observação de que o desgaste inicial ocorre por pequenas lascas próximas à aresta de corte principal.

A Figura 8 ilustra uma ferramenta após 20 passes, mostrando evidências de destacamento do revestimento e desgaste de flanco, expondo o substrato.

Na análise detalhada da Figura 7, a superfície do substrato foi examinada utilizando EDS, com pontos P1, P2 e P3, cujos resultados são apresentados na Figura 9 (a), (b) e (c). A Figura 7 evidenciou o destacamento do revestimento e o desgaste de flanco, expondo o substrato. Os resultados do EDS no ponto 1 indicam que parte do revestimento foi removida.

No ponto 2, o EDS revela a presença de material da peça aderido à ferramenta. O ponto 3 indica a presença de carboneto de tungstênio.

A Figura 10 apresenta o destacamento do revestimento e a exposição do substrato durante a usinagem do aço com fluido refrigerante, em uma velocidade de corte de 120 m/min e avanço de 0,10 mm/dente. O desgaste abrasivo na aresta de corte também foi observado.

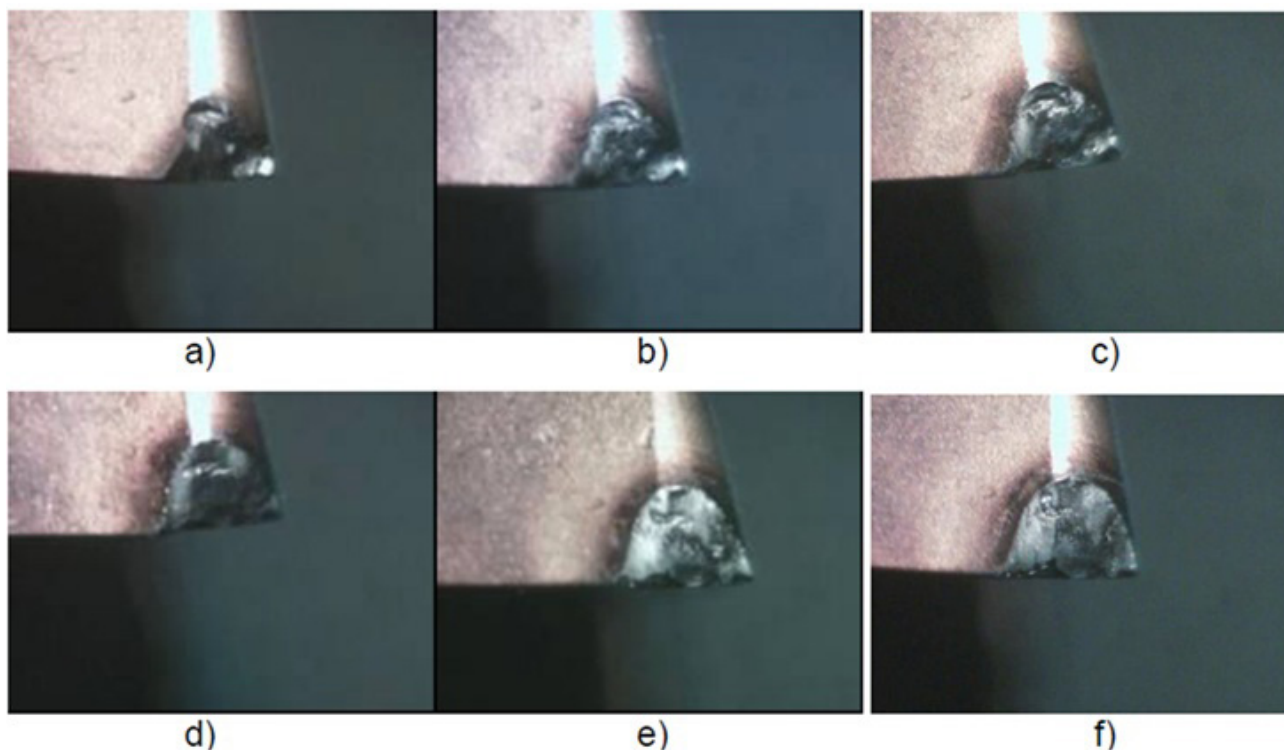


Figura 6. Evolução do desgaste na Ferramenta 1, (a) 2º passe, (b) 4º passe, (c) 8º passe, (d) 12º passe, (e) 16º passe, (f) 20º passe. Aumento de 15X.

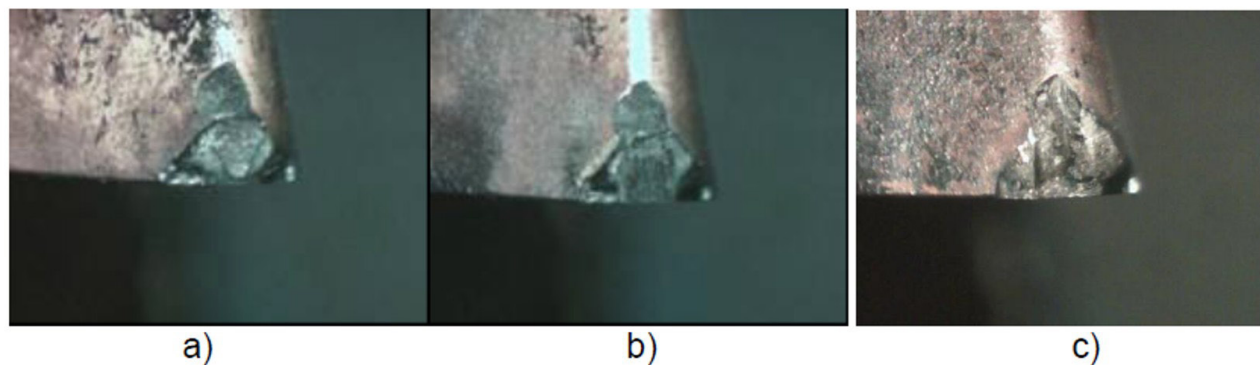


Figura 7. Evolução do desgaste na Ferramenta 1 a seco, (a) 2º passe, (b) 4º passe e (c) 12º passe. Aumento de 15X.

As Figuras 11 (a) e (b) mostram a rugosidade superficial em função do número de passes. A análise dos gráficos indica que o desgaste da ferramenta não possui uma relação direta com a rugosidade superficial. Observa-se que, com o aumento do desgaste da ferramenta, a rugosidade superficial apresenta oscilações, aumentando ou diminuindo de acordo com o formato do lascamento impresso na peça.

Além disso, foi identificado que a ferramenta apresentou um padrão de desgaste semelhante ao desgaste de entalhe. Embora a literatura não ofereça um consenso claro sobre as causas desse tipo de desgaste, as áreas afetadas frequentemente apresentam condições de escorregamento, onde os mecanismos de abrasão e transferência de material

(difusão e atrito) são predominantes. A análise da área da ferramenta afetada pelo desgaste abrasivo revelou a presença de trincas mecânicas. Essas trincas, dispostas paralelamente à aresta de corte, são geradas pela variação das forças aplicadas à ferramenta durante as entradas e saídas constantes da peça.

Verifica-se ao analisar os gráficos de rugosidade superficial, que o desgaste da ferramenta não tem uma relação direta com a rugosidade superficial. Aumentando o desgaste da ferramenta a rugosidade superficial oscila, aumentando ou diminuindo conforme o formato do lascamento impresso na peça.

O detalhe evidenciando o desgaste abrasivo sofrido pela ferramenta na usinagem do aço ABNT 4140 temperado

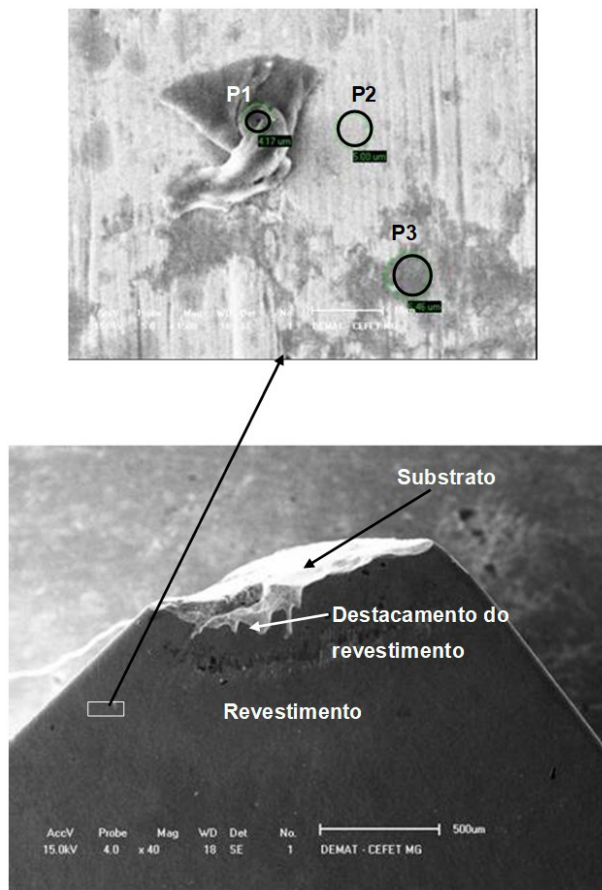


Figura 8. Ferramenta após desgaste no fresamento do aço ABNT 4140 com fluido refrigerante e avarias causadas no passe final, $v_c=120$ m/min. $f=0,10$ mm/dente com refrigeração, ampliação 40X, detalhe ampliação 1500X.

e revenido com fluido refrigerante pode ser observado na Figura 12. Percebe-se também os riscos na ferramenta usada no fresamento.

A Figura 13 apresenta a média e o desvio padrão do desgaste observado em cada ferramenta, considerando os respectivos avanços. O aumento do avanço de corte tende a acarretar um aumento nos níveis do desgaste da ferramenta de corte. Não se observa uma relação direta entre o desgaste da ferramenta e a rugosidade superficial.

Ao aplicar um método de comparação entre os dois tratamentos, verificou-se que as variações de desgaste entre as condições a seco e refrigeradas não são significativas. Para o avanço de $f=0,05$ mm/dente, obteve-se para o Teste $T=0,073 \gg T(29;0,025)=2,04$; para $f=0,10$ mm/dente, $T=0,09 \gg T(29;0,025)=2,04$; e para $f=0,15$ mm/dente, $T=0,609 \gg T(29;0,025)=2,04$. Portanto, conclui-se que, com um nível de significância de 5%, os dois métodos não apresentam diferenças significativas. Essa conclusão é corroborada pelos resultados obtidos a partir do gráfico da média total, que compara todos os testes a seco com aqueles realizados com fluido.

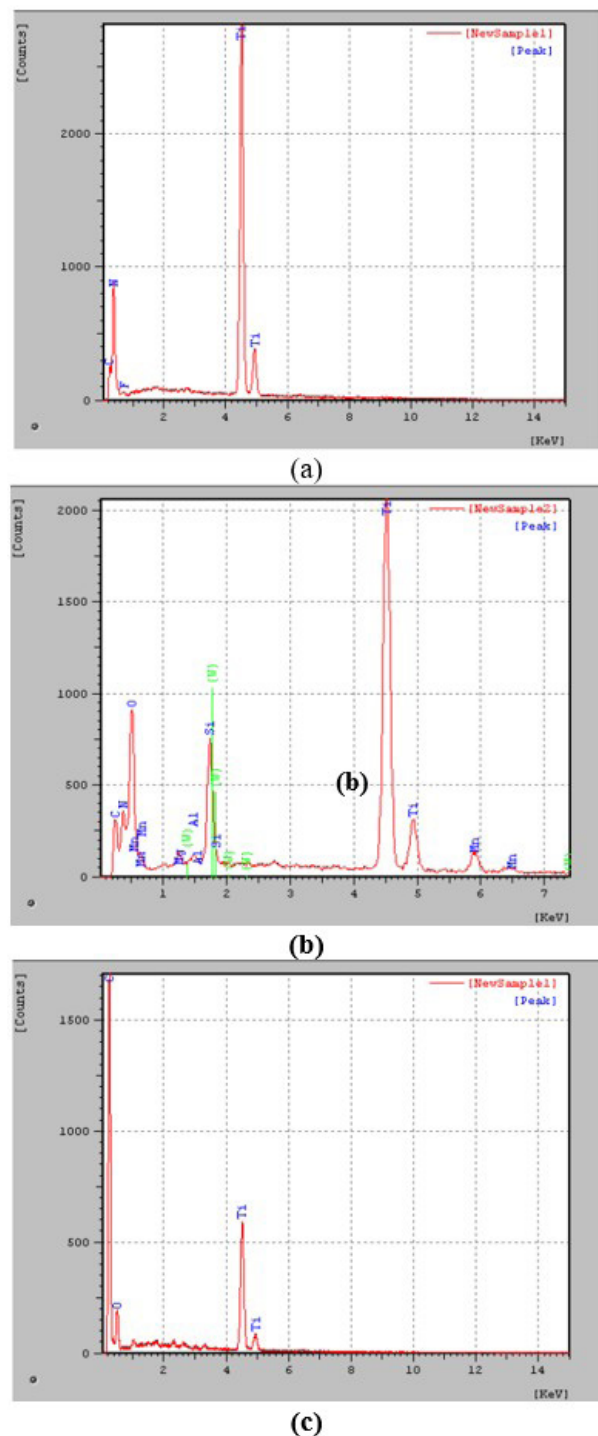


Figura 9. Espectro EDS (a) ponto 1 (P1), (b) ponto 2 (P2) e (c) ponto 3 (P3).

A Figura 14 ilustra o desgaste discriminado por ferramenta. Observou-se que a Ferramenta 1 apresentou o maior desgaste em condições de corte a seco, enquanto a Ferramenta 2 teve o menor desgaste, também sob condições a seco. O desvio padrão elevado deve-se aos constantes lascamentos da aresta de corte, como evidenciado pela geometria da ferramenta.

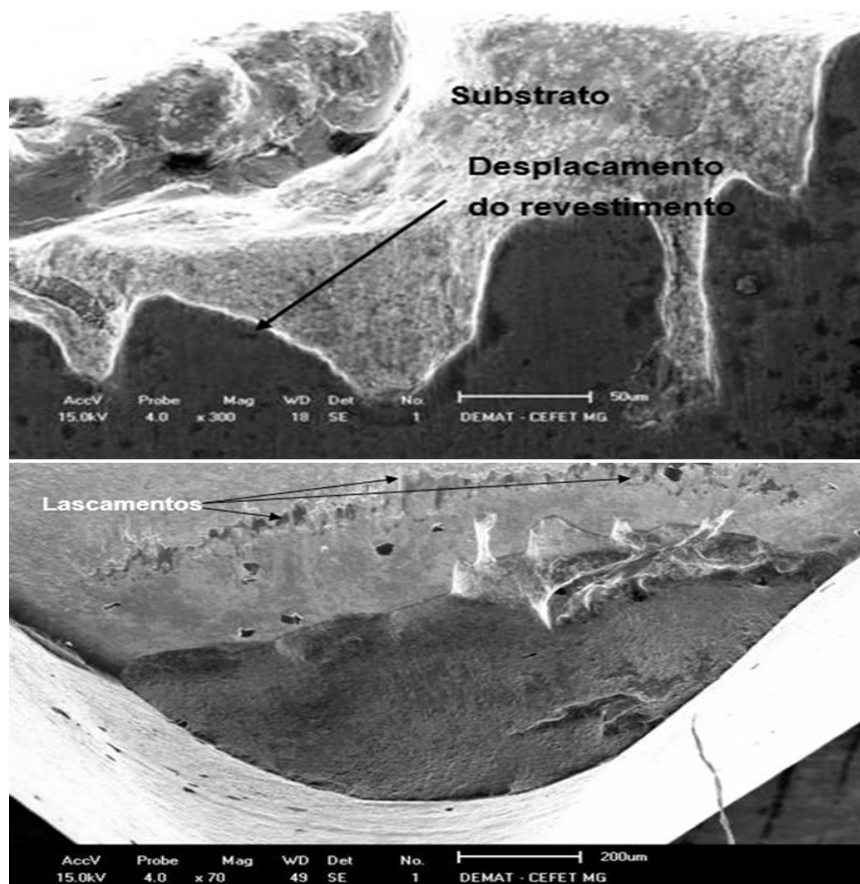


Figura 10. Detalhe do deslocamento do revestimento e exposição do substrato na usinagem (300X) e fotografia evidenciando os lascamentos causados pelo fresamento.

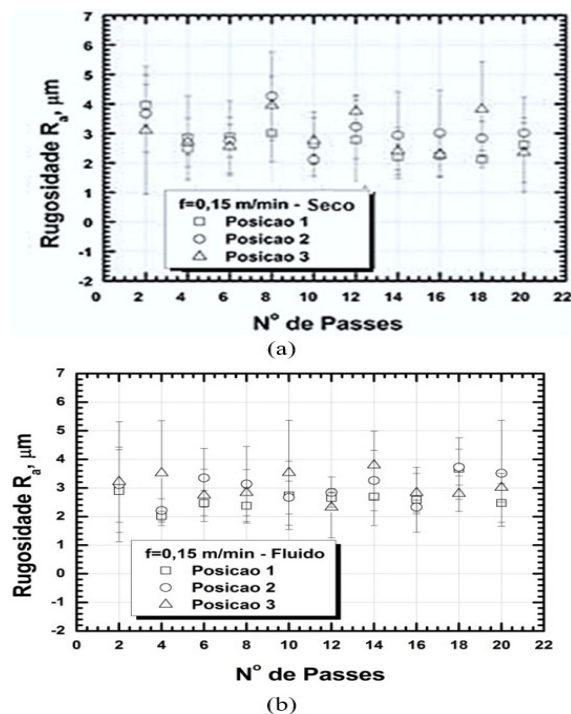


Figura 11. Análise de rugosidade R_a das superfícies usinadas para $vc = 120$ m/min, avanço de corte de 0,15 mm/dente a seco (a) e com fluido de corte (b).

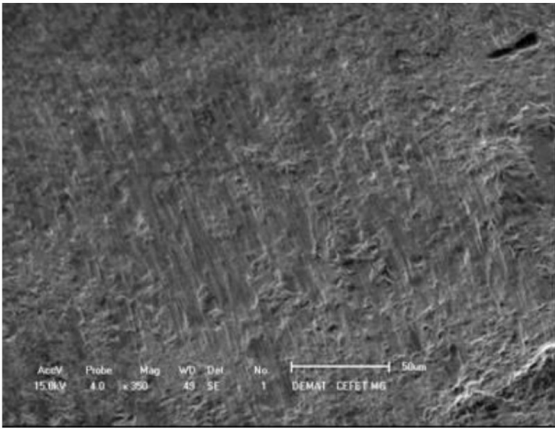


Figura 12. Riscos causados por abrasão na ferramenta durante o fresamento com fluido refrigerante do aço ABNT 4140 temperado e revenido. Ampliação 350X.

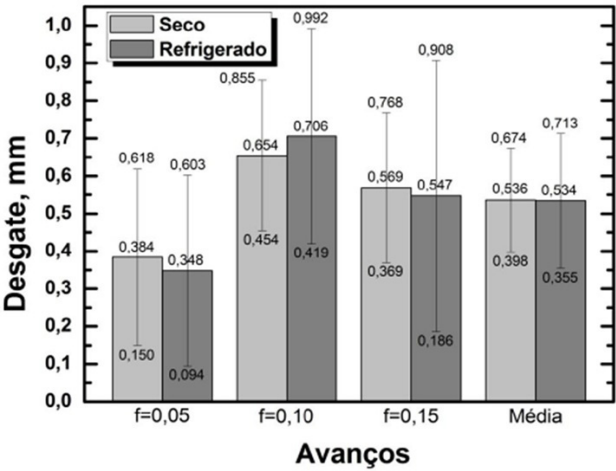


Figura 13. Médias de desgaste das ferramentas, corte a seco e com refrigeração em diferentes avanços, e média geral.

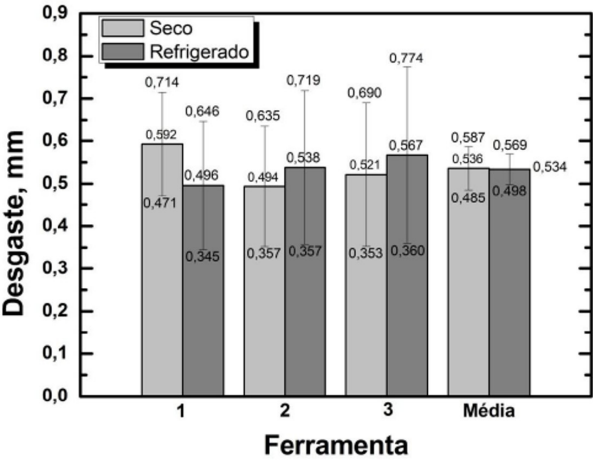


Figura 14. Médias de desgaste das ferramentas individualizadas em condições de corte a seco e refrigerado e média geral.

4 Conclusões

Os testes realizados evidenciaram que o processo de corte refrigerado apresentou um desgaste médio da ferramenta de corte similar ao observado em cortes a seco, quando se compara o desgaste médio da ferramenta de corte. A análise demonstrou que a refrigeração limita o aquecimento da ferramenta de maneira geral, com a exceção da área de contato entre a ferramenta e o cavaco. No entanto, a refrigeração provocou um aumento na variação de temperatura (ΔT), que contribuiu para o surgimento de trincas térmicas na ferramenta.

A utilização de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) combinada com Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) permitiu a visualização do desprendimento do revestimento e do desgaste da face de corte, resultando na

exposição do substrato subjacente. A análise EDS revelou que uma fração do revestimento foi removida, e que o material da peça processada se aderiu à ferramenta de corte.

A comparação entre os métodos de corte a seco e refrigerado, utilizando uma abordagem de comparação de dois tratamentos, mostrou que a diferença no desgaste entre esses métodos não é estatisticamente significativa, com um valor de T de 2,04 para todos os avanços analisados neste estudo. Assim, conclui-se que, no nível de significância de 5%, ambos os métodos não apresentam diferenças significativas.

Os mecanismos de desgaste identificados nas ferramentas incluem abrasão, desgaste por entalhe, desprendimento do revestimento e lascamento, todos contribuindo para a degradação do desempenho da ferramenta ao longo do tempo.

Referências

- Ding P, Huang X, Li S, Zhao C, Zhang X. Real-time reliability analysis of micro-milling processes considering the effects of tool wear. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023;200:110582. <http://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110582>.
- Zhang X, Gao Y, Guo Z, Zhang W, Yin J, Zhao W. Physical model-based tool wear and breakage monitoring in milling process. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023;184:109641. <http://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109641>.
- Rizal M, Ghani JA, Nuawi MZ, Haron CHC. Cutting tool wear classification and detection using multi-sensor signals and Mahalanobis-Taguchi System. *Wear*. 2017;376:1759-1765. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.017>.
- Liu ZQ, Ai X, Zhang H, Wang ZT, Wan Y. Wear patterns and mechanisms of cutting tools in high-speed face milling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002;129(1-3):222-226. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00605-2](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00605-2).
- Sonia P, Jain JK, Saxena KK. Influence of ultrasonic vibration assistance in manufacturing processes: a Review. *Materials and Manufacturing Processes*. 2021;36(13):1451-1475. <http://doi.org/10.1080/10426914.2021.1914843>.
- Yang Z, Zhu L, Zhang G, Ni C, Lin B. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2020;156:103594. <http://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103594>.
- Sousa VFC, Fernandes F, Silva FJG, Costa RDFS, Sebbe N, Sales-Contini RCM. Wear behavior phenomena of TiN/TiAlN HiPIMS PVD-Coated tools on Milling Inconel 718. *Metals*. 2017;13(4):684. <http://doi.org/10.3390/met13040684>.
- Skordaris G, Bouzakis K-D, Charalampous P, Bouzakis E, Paraskevopoulou R, Lemmer O, et al. Brittleness and fatigue effect of mono- and multi-layer PVD films on the cutting performance of coated cemented carbide inserts. *CIRP Annals*. 2014;63(1):93-96. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.081>.
- Uhlmann E, Stawiszynski B, Leyens C, Heinze S, Sammler F. Sammler. Hard turning of hot work and cold work steels with HIPIMS and DCMS TiAlN coated carbide inserts. *Procedia CIRP*. 2016;46:591-594. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.231>.
- Siow PC, Ghani JA, Ghazali MJ, Jaafar TR, Selamat MA, Che Haron CH. Characterization of TiCN and TiCN/ZrN coatings for cutting tool application. *Ceramics International*. 2013;39(2):1293-1298. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.07.061>.
- Ducros C, Benevent V, Sanchette F. Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools. *Surface and Coatings Technology*. 2003;163-164:681-688. [http://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00656-4](http://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00656-4).
- Aihua L, Jianxin D, Haibing C, Yangyang C, Jun Z. Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2012;31:82-88. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.09.010>.
- Bouzakis KD, Michailidis N, Skordaris G, Bouzakis E, Biermann D, M'Saoubi R. Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization. *CIRP Annals*. 2012;61(2):703-723. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.006>.

- 14 Skordaris G, Bouzakis KD, Charalampous P. A dynamic FEM simulation of the nano-impact test on mono- or multi-layered PVD coatings considering their graded strength properties determined by experimental-analytical procedures. *Surface and Coatings Technology*. 2015;265:53-61. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.01.063>.
- 15 Fu Q, Lundin D, Nicolescu CM. Anti-vibration engineering in internal turning using a carbon nanocomposite damping coating produced by PECVD process. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014;23(2):506-517. <http://doi.org/10.1007/s11665-013-0781-y>.
- 16 Singh O, Malik HK, Dahiya RP, Kulriya PK. Tuning of mechanical and structural properties of 20 MC 5 steel using N ion implantation and subsequent annealing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;710:253-259. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.097>.
- 17 Karagöz S, Fischmeister HF. Metallographic observations on the wear process of TiN-coated cutting tools. *Surface and Coatings Technology*. 1996;81(2):190-200. [http://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02487-5](http://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02487-5).
- 18 Del AG, Alonso U, Veiga F, Arizmendi M. Wear mechanisms of TiN coated tools during high-speed tapping of GGG50 nodular cast iron. *Wear*. 2023;514-515. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204558>.
- 19 Binali R, Demirpolat H, Kuntoğlu M, Sağlam H. Machinability investigations based on tool wear, surface roughness, cutting temperature, chip morphology and material removal rate during dry and MQL-Assisted milling of nimax mold steel. *Lubricants*. 2023;11(3):101. <http://doi.org/10.3390/lubricants11030101>.
- 20 Gajrani KK, Suvin PS, Kailas SV, Sankar MR. Hard machining performance of indigenously developed green cutting fluid using flood cooling and minimum quantity cutting fluid. *Journal of Cleaner Production*. 2019;206:108-123. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.178>.
- 21 Lim SC, Lim CYH. Effective use of coated tools: the wear-map approach. *Surface and Coatings Technology*. 2001;39(2-3):127-134. [http://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)01163-4](http://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)01163-4).
- 22 Zheng YK, Pramanik A, Basak AK, Dong Y, Prakash C, Shankar S, et al. Application of coolants during tool-based machining: a review. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023;14(1):101830. <http://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101830>.
- 23 Stachurski W, Sawicki J, Wójcik R, Nadolny K. Influence of application of hybrid MQL-CCA method of applying coolant during hob cutter sharpening on cutting blade surface condition. *Journal of Cleaner Production*. 2018;171:892-910. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.059>.
- 24 Gao Z, Zhang H, Ji M, Zuo C, Zhang J. Influence of Various Cooling and Lubrication Conditions on Tool Wear and Machining Quality in Milling Inconel 718. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2024;11:391-406. <http://doi.org/10.1007/s40684-023-00558-9>.
- 25 Rashid AL, He N, Jamil M, Muhammad IH, Munish KG, Krolczyk GM. A state-of-the-art review on recently developed sustainable and green cooling/lubrication technologies in machining Metal Matrix Composites (MMCs). *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2023;10:1637-1660. <http://doi.org/10.1007/s40684-023-00521-8>.
- 26 ISO: International Organization for Standardization. ISO 3585:1998: specification for tool life testing with single point turning tools. Geneva: ISO; 1998.
- 27 Bouzakis KD, Hadjiyiannis S, Skordaris G, Anastopoulos J, Mirisidis I, Michailidis N, et al. The Influence of the coating thickness on its strength properties and on the milling performance of PVD coated inserts. *Surface and Coatings Technology*. 2003;174-175:393-401. [http://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00678-9](http://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00678-9).
- 28 Vieira JM, Machado AR, Ezugwu EO. Performance of cutting fluids during face milling of steels. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;116(2-3):244-251. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01010-X](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01010-X).
- 29 Raza MH, Hafeez F, Zhong RY, Imran A. Investigation of surface roughness in face milling processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020;111(9-10):2589-2599. <http://doi.org/10.1007/s00170-020-06188-8>.
- 30 Singh J, Gill SS, Dogra M, Singh R. A review on cutting fluids used in machining processes. *Engineering Research Express*. 2021;3(1):012002. <http://doi.org/10.1088/2631-8695/abeca0>.

Recebido em: 15 Out. 2024

Aceito em: 21 Maio 2025

Editor responsável:

André Luiz Vasconcellos da Costa e Silva 