

INFLUÊNCIA DO EMPREGO DE AR RESFRIADO NO PROCESSO DE FRESAMENTO DO AÇO AISI H13 COM FRESAS DE TOPO ESFÉRICO

Alexandre Venturi

Milton Luiz Polli

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 – Cidade Industrial

alexandre.venturi92@gmail.com

polli@utfpr.edu.br

Gil Magno Portal Chagas

Instituto Federal de Santa Catarina, Rua dos Imigrantes, 445 – Rau, Jaraguá do Sul – SC

gilchagas@ifsc.edu.br

Resumo: A otimização dos processos de usinagem tem sido explorada pelas indústrias metalomecânica para aumentar sua produtividade, bem como reduzir seus custos de fabricação e problemas ambientais, para que se mantenham competitivas no mercado. O fresamento é um dos processos de usinagem mais utilizados e de grande importância na fabricação de peças com geometrias complexas. Essas geometrias são muito comuns em moldes e matrizes, e entre as ferramentas de usinagem mais utilizadas para sua fabricação, destacam-se as fresas de topo esférico, por serem adaptáveis à fabricação dessas geometrias. Os aços AISI H13 são materiais bastante utilizados em moldes e matrizes por apresentarem algumas características, como resistência à exposição a temperaturas elevadas, alta tenacidade e resistência à fadiga térmica. Para essas aplicações, tais aços são tratados termicamente e sua dureza pode ficar entre 45 e 64 HRC. Entretanto, devido a essas características, é comum surgirem dificuldades no processo de usinagem desses aços, como o alto aquecimento na interface cavaco-ferramenta e desgaste excessivo da ferramenta. Com base nisso, este trabalho objetivou analisar a influência do sistema de refrigeração a ar frio na qualidade da superfície usinada e na vida das fresas de topo esférico revestidas em TiALN no processo de fresamento em cinco eixos do aço AISI H13 endurecido em superfícies inclinadas. Foram analisados os desgastes das ferramentas e as temperaturas de usinagem com diferentes sistemas de refrigeração. Foram adotados os sistemas de refrigeração a ar comprimido e ar frio aplicado por tubo de vórtice. Os parâmetros de corte permaneceram fixos. Para as análises das temperaturas abaixo da superfície usinada foram utilizados termopares inseridos nos corpos de prova. Os resultados mostram que, com ar frio, ocorreram os menores valores de rugosidades e temperaturas de usinagem. A ferramenta testada apresentou bom desempenho nas condições utilizadas, pois houve ausência de problemas, como desgaste acentuado e dificuldade de controle da quebra do cavaco.

Palavras-chave: Fresamento duro; Fresa de topo esférico; Tubo de vórtice; AISI H13.

1. INTRODUÇÃO

Moldes e matrizes são comuns em diversos ramos industriais, como automotivo, aeronáutico e de geração de energia (Cao *et al.*, 2016; Sai *et al.*, 2018). Geralmente são fabricados de aço AISI H13 endurecido e possuem como característica perfis de alta complexidade, que dificultam sua usinagem. Entretanto, para essas usinagens as ferramentas de fresamento são as mais utilizadas, pois permitem maior flexibilidade (Oliveira e Diniz, 2009). As operações de semiacabamento e acabamento costumam ser as mais demoradas, pois o material se encontra com elevada dureza devido ao tratamento térmico, além de serem utilizadas ferramentas de pequenos diâmetros (Dewes e Aspinwall, 1997). Segundo Batista (2006), muitas vezes o acabamento de qualidade não é atingido dentro do esperado devido à falta do conhecimento dos fenômenos envolvidos na usinagem.

O fresamento de topo esférico é bastante utilizado para a fabricação de moldes e matrizes, componentes da indústria aeroespacial e demais peças com geometrias complexas, por ser uma ferramenta adaptável a tais geometrias (Toh, 2004; Daymi, *et al.*, 2009; Dong *et al.*, 2021).

Os meios lubri-refrigerantes são bastante utilizados nos processos de usinagem e, dentre os vários tipos existentes, cerca de dois terços são utilizados de maneira tradicional, com aplicação por jorro (Singh, 2022). Na composição de grande parte desses lubri-refrigerantes pode conter óleo mineral, sabão, detergente sintético, carga sólida ativa ou neutra, entre outros aditivos químicos (Gürkan *et al.*, 2020). No entanto, estes causam problemas de saúde a quem os manipula, além de provocar poluição ambiental (Singh, 2022). Além disso, a concepção de sustentabilidade progrediu gradualmente, ganhando interesse global tornando-se indispensável e com grandes tendências nas pesquisas modernas para a redução da utilização de lubrificantes (Sen *et al.*, 2019). E ainda, de acordo com Çakir *et al.* (2015), o impacto ao meio ambiente e a saúde humana está diretamente relacionado a um processo de fabricação bem-sucedido.

A aplicação de ar frio para a dissipação do calor na interface cavaco-ferramenta corresponde a uma alternativa mais econômica e menos poluente, podendo ser feita através do tubo de vórtice, que corresponde a um dispositivo simples, mas que produz ar frio, sendo capaz de reduzir o custo de fabricação e impactos ambientais, quando comparado aos métodos tradicionais de refrigeração (Gupta, 2013; Singh, 2022).

Os tubos de vórtice são classificados com base na saída do ar frio e em seus padrões de fluxo. Segundo Sharma *et al.* (2016), o tubo de vórtice de contrafluxo é o mais comum. Neste caso, a entrada do ar é tangente ao tubo, passando por uma parede paralela e chegando até a válvula de controle de fluxo cônica, onde o ar é dividido. Desse ponto, a maior parte do ar sai quente pela extremidade exaustora e outra parte retorna frio pela extremidade principal, conforme apresentado na Figura 1 (Vortec, 2022). Esses são os mais utilizados para refrigeração da interface cavaco-ferramenta em processos de usinagem (Emuge Franken, 2022; Exair, 2022; Nex Flow, 2022).



Figura 1. Tubo de vórtice de contra fluxo (Adaptado de Vortec, 2022)

Considerando a urgência de tornar o processo de fresamento de materiais endurecidos menos nocivo ao meio ambiente, bem como a necessidade de promover uma boa produtividade e redução do custo do processo sem comprometer a qualidade da superfície usinada, o estudo apresentado visa a analisar a influência do emprego do ar resfriado por tubo de vórtice na qualidade da superfície usinada e na vida das fresas de topo esférico revestidas em Nitreto de Titânio - Alumínio (TiALN), no processo de fresamento do aço AISI H13 endurecido.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

O material utilizado para os ensaios de usinagem foi o aço AISI H13 tratado termicamente. A Tabela 1 apresenta a composição química nominal do material utilizado. A dureza do material foi medida após seu tratamento térmico com o durômetro VEB HP200 utilizando penetrador cone reto de diamante com ângulo de vértice de 150° e uma força de ensaio de 150 Kgf. Foram feitas duas medições de dureza em cada quadrante do corpo de prova, as quais constaram dureza de 48HRC.

Tabela 1. Composição química do aço H13 (Villares Metals, 2022)					
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,40	1,10	0,35	5,20	1,50	0,90

A geometria do corpo de prova está apresentada na Figura 2. O corpo de prova foi dividido em quatro quadrantes, de modo que permite realizar um ensaio por quadrante. Nas furações de diâmetro de 3 mm, foram inseridos os termopares tipo T para verificar a temperatura abaixo da superfície usinada durante o processo de usinagem. Essas furações foram feitas apenas após o tratamento térmico, para evitar trincas e concentração de tensão.

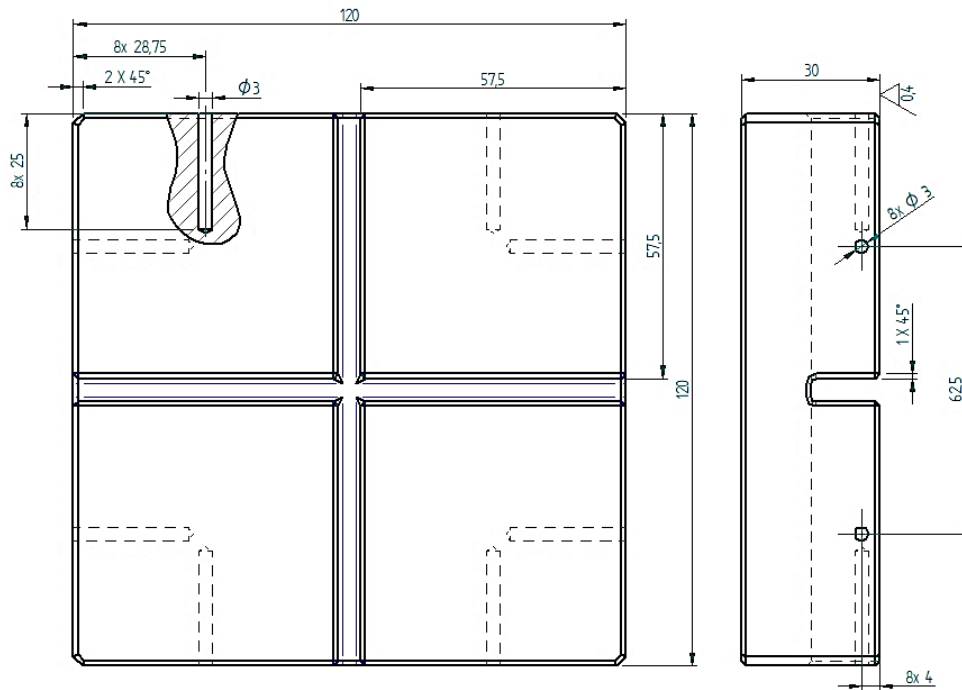


Figura 2. Geometria e dimensões do corpo de prova (Os autores, 2023)

2.2. Ferramentas de corte

Para a realização do fresamento nos corpos de prova foi selecionada uma fresa de topo esférico de metal duro, marca Guhring, com duas arestas e revestidas em TiALN através do processo PVD, com raio de ponta de 5 mm. As classes de indicação dessa fresa são para aços-carbono e aços-liga (ISO P), aços inoxidáveis (ISO M), ferros fundidos (ISO K), não-ferrosos (ISO N), superligas (ISO S) e aços endurecidos (ISO H). Para cada material a ser usinado existe uma faixa de condições de corte indicada pelo fabricante. A Figura 3 apresenta as dimensões da ferramenta utilizada.

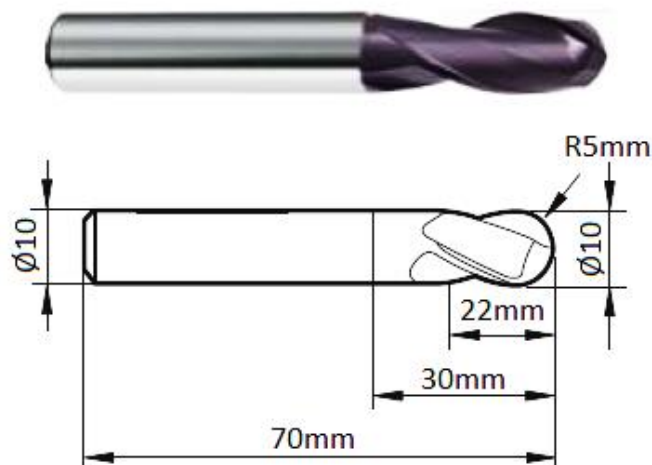


Figura 3. Fresa de topo esférico (Adaptado de Guhring, 2022)

O fabricante indica, para esta ferramenta, a velocidade de corte de 49 a 61 m/min, com avanço por aresta de até 0,39 mm, e profundidade de corte radial e axial de até 0,5 mm para os aços H13 46-48HRC. Dessa forma, neste trabalho foram adotados valores dentro das faixas recomendadas.

2.3. Dispositivo para aplicação de ar frio

O ar frio para refrigerar a usinagem foi aplicado pelo tubo vórtice, cujo dispositivo utilizado para fixar o tubo está apresentado na Figura 4. O ar comprimido, que passou por um sistema de desumidificação com secador com ponto de orvalho a 5°C, entra no dispositivo com uma pressão de 6 bar por meio da entrada “a”. Em “b” tem-se a saída do ar frio a ser utilizado no ensaio e em “c” a saída do ar quente. O bico de saída do ar frio ficou 70 mm distante da aresta de corte para evitar colisão com alguma parte da máquina, ferramenta ou corpo de prova durante a usinagem.



Figura 4. Dispositivo para aplicação de ar frio (Os autores, 2023)

2.4. Métodos

Para a usinagem dos corpos de prova foi utilizado o centro de usinagem 5 eixos Hermle C40. Os meios refrigerantes adotados foram o ar comprimido e o ar refrigerado por tubo de vórtice a uma pressão de 6 bar. O tubo de vórtice foi regulado com auxílio de termômetro de contato digital, o qual constou uma temperatura de 0 a -2°C no bico de saída. A temperatura ambiente durante os ensaios foi de 25,7°C. Para cada condição de usinagem foram feitos três ensaios. Os incrementos das profundidades de corte foram no sentido descendente, com avanço de usinagem de maneira concordante. O tempo de corte de cada ensaio foi de 24 minutos. A Tabela 2 apresenta o número de ensaio e as condições de usinagem utilizadas, e a Figura 5 apresenta de maneira esquemática os ângulos de inclinação de usinagem, sentido de corte e profundidade de corte. A Fig. 5 foi gerada com o auxílio do sistema CAD, o qual auxiliou na identificação do diâmetro efetivo de corte ($\varnothing 9,709$ mm) nas condições utilizadas.

Tabela 2. Condições de usinagem (Os autores, 2023)

Ensaio	Sistema de resfriamento	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/gume)	Profundidade de corte radial (ae)	Profundidade de corte axial (ap)	Lead angle	Tilt angle	rpm
1	ar refrigerado	60	0,03	0,2 mm	0,2 mm	4°	15°	1965,18
2	ar	60	0,03	0,2 mm	0,2 mm	4°	15°	1965,18
3	ar	60	0,03	0,2 mm	0,2 mm	4°	15°	1965,18
4	ar refrigerado	60	0,03	0,2 mm	0,2 mm	4°	15°	1965,18
5	ar refrigerado	60	0,03	0,2 mm	0,2 mm	4°	15°	1965,18
6	ar	60	0,03	0,2 mm	0,2 mm	4°	15°	1965,18

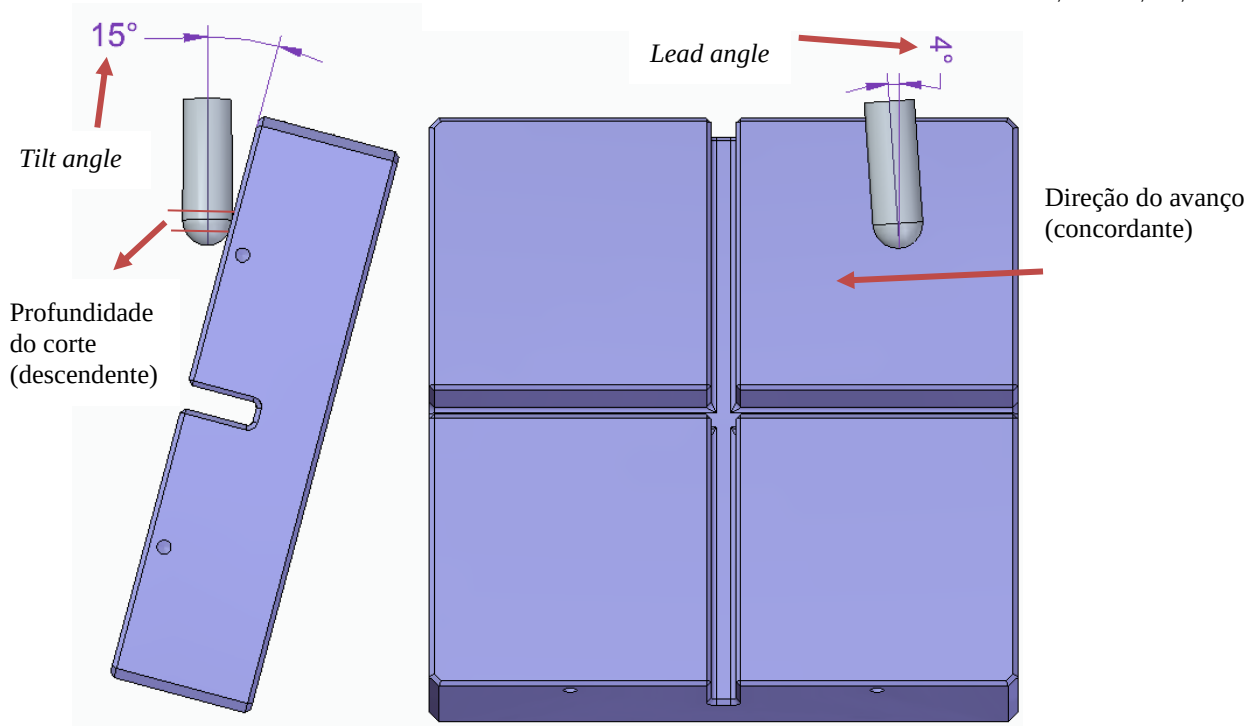


Figura 5. Indicação de ângulos de inclinação, profundidade de corte e direção de usinagem (Os autores, 2023)

Durante os ensaios foram coletadas amostras dos cavacos, bem como foi observada a temperatura abaixo da superfície usinada utilizando termopares do tipo T. A coleta de dados das temperaturas foi feita com o auxílio de um registrador Yokogawa GP10 de 20 canais. Após os ensaios de usinagem foram medidas as rugosidades R_a (desvio aritmético médio) e R_z (Altura máxima do perfil), no sentido da profundidade de corte, utilizando o rugosímetro Perthometer S2. O rugosímetro foi configurado conforme a norma ISO 3274, com *Cutoff* de 0,25 μm .

Foram feitas três medições para cada ensaio realizado, bem como foi realizada uma análise de variância (ANOVA). Além disso, foram retiradas amostras de cavacos para analisar o seu formato.

Para a análise de desgaste das ferramentas, utilizou-se um Microscópio óptico KOZ-004 e o estereoscópio do fabricante Zeiss, modelo Stemi 2000-C, com uma câmera acoplada Axio Cam ER 5s e ampliação de 5x.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise das temperaturas

A média dos valores máximos das temperaturas obtidas nos três experimentos de cada condição apresentadas pelos termopares estão apresentados na Tabela 3. Foi possível observar uma maior temperatura com a utilização do ar como meio refrigerante. Os termopares indicaram uma temperatura 9,2% maior com o sistema de resfriamento a ar, se comparado ao ar resfriado.

Tabela 3. Temperaturas máximas indicadas pelos termopares abaixo da superfície usinada (Os autores, 2023)

Meio refrigerante	Temperatura
Ar	26,2 °C
Ar resfriado	24 °C

3.2. Análise de desgaste da ferramenta

A ferramenta apresentou uma boa integridade, com ausência de desgastes significativos nas condições testadas. Porém, por meio das análises realizadas pelo microscópio óptico, foram identificadas pequenas marcas de desgaste na cobertura da ferramenta, devido à abrasão entre ela e o material usinado. Essas marcas de desgaste na cobertura ficaram mais visíveis na condição de refrigeração a ar. A (a)

Figura 6 (b) e a Figura 7 (b) apresentam exemplos das marcas identificadas. Em ambas as condições, foram identificadas adesões do material nas ferramentas, conforme apresentado na (a)

Figura 6 (a) e Figura 7 (a).

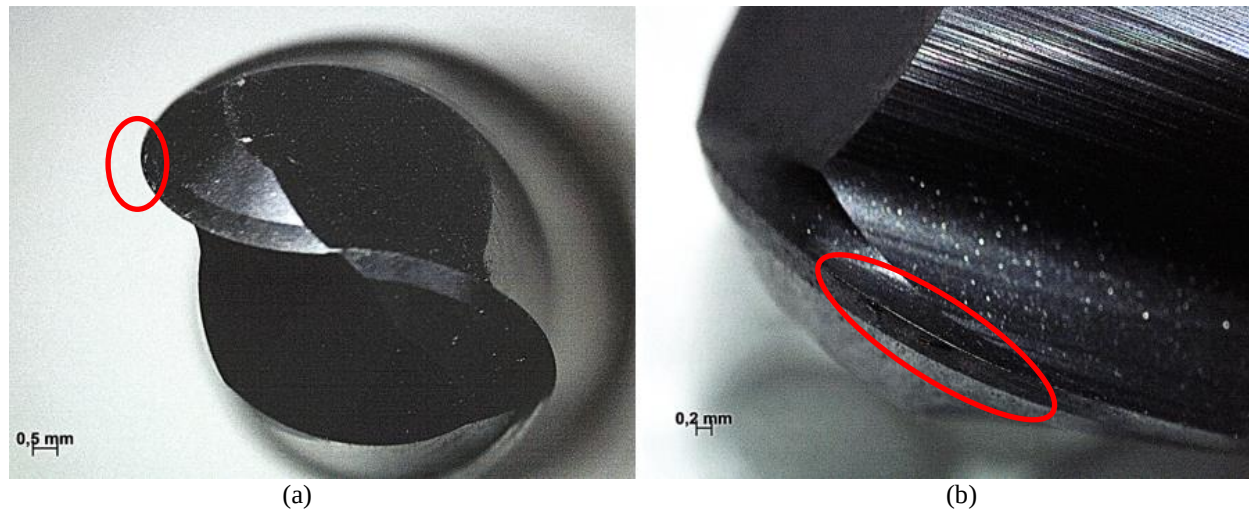


Figura 6. Adesão e marca de abrasão utilizando o sistema de refrigeração a ar (Os autores, 2023)

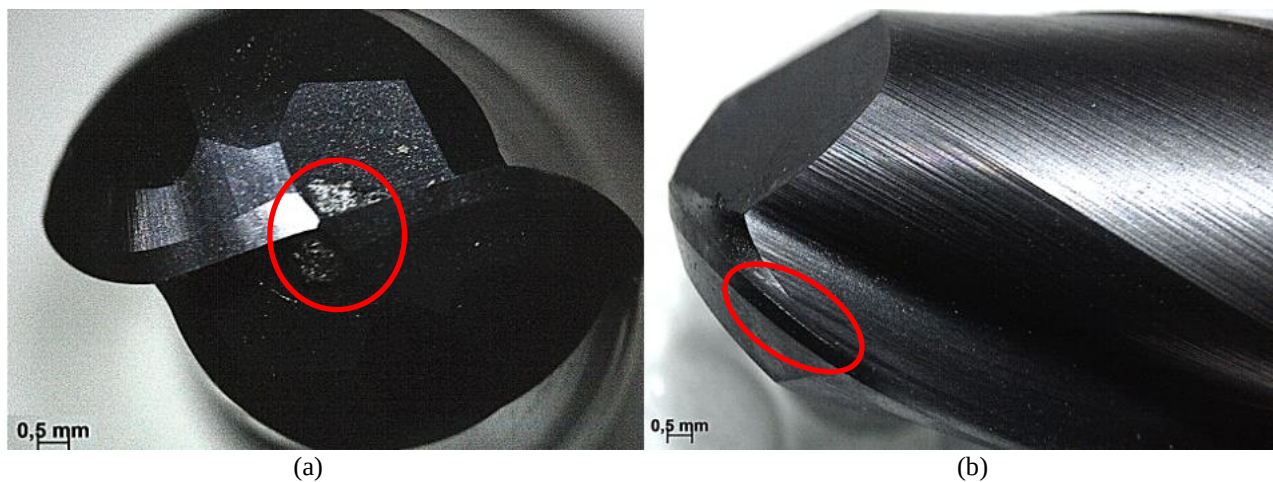


Figura 7. Adesão e marca de abrasão utilizando o sistema de refrigeração a ar frio (Os autores, 2023)

3.3. Análise das rugosidades

Optou-se por avaliar a rugosidade média (R_a) por ser o parâmetro mais utilizado na usinagem. Com os dados da rugosidade, foi efetuada a ANOVA (análise de variância), bem como foi gerado o gráfico de intervalos de confiança, cujos resultados são apresentados na Figura 8 e na Tabela 4.

Conforme pode ser verificado na Tabela 4, o valor “p” para o meio refrigerante ficou inferior a 0,05. Este resultado indica com 95% de confiança que há diferenças significativas na rugosidade quando é alterado o meio refrigerante. A média dos valores da rugosidade com o sistema de resfriamento a ar frio ficou em $0,310 \mu\text{m}$, enquanto com o ar a média obtida foi de $0,524 \mu\text{m}$, indicando que com o meio refrigerante a ar há um aumento na rugosidade de aproximadamente 69% em relação ao meio refrigerante a ar refrigerado. De acordo com Kumar e Gandotra (2020), uma possível explicação para isso é que o ar refrigerado pode auxiliar na redução da abrasão entre a ferramenta e o material usinado.

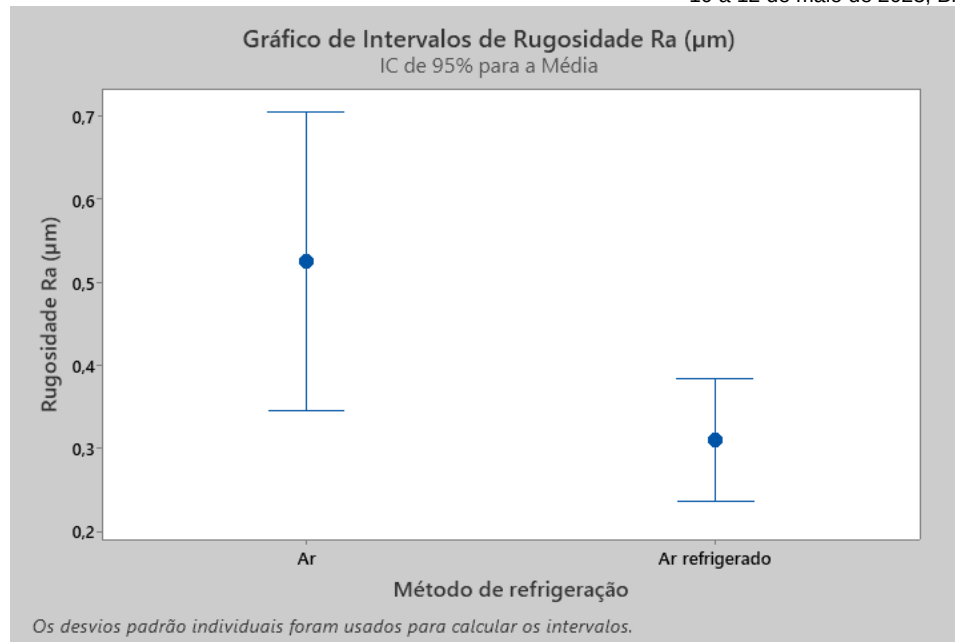


Figura 8. Intervalos de confiança (Os autores, 2023)

Tabela 4. ANOVA – 95% de Confiança (Os autores, 2023)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Meio refrigerante	0,21	1,00	0,21	6,47	0,02	4,49
Dentro dos grupos	0,51	16,00	0,03			
Total	0,72	17,00				

3.4. Análise dos cavacos

De acordo com a norma ISO 3685:1993, a forma encontrada dos cavacos foi do tipo agulha (ISO, 1993). Esse resultado está de acordo com o estudo feito por Chen *et al.* (2013), em que os autores avaliaram diferentes ângulos de inclinação da ferramenta no fresamento de topo esférico do aço AISI H13. Não foram identificadas diferenças de cor, tamanho e forma entre os cavacos nas condições testadas. A Figura 9 (a) apresenta os cavacos utilizando o sistema de refrigeração a ar; a Figura 9 (b), por sua vez, com o ar resfriado.



Figura 9. Amostra de cavacos (Os autores, 2023)

4. CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados obtidos, a fim de avaliar a influência do emprego de ar resfriado no processo de fresamento do aço AISI H13 com as fresas de topo esférico, pode-se concluir que a ferramenta de corte testada apresentou uma boa eficiência nas condições avaliadas, com ausência de problemas como desgaste acentuado e dificuldade de controle do cavaco.

O revestimento de TiAlN da ferramenta teve um bom desempenho na análise realizada, pois resistiu ao teste sem apresentar desgaste acentuado.

Os menores valores de rugosidade obtidos foram com o emprego do sistema de refrigeração a ar frio. Para moldes e matrizes, quanto menor a rugosidade final obtida pelos processos de usinagem, menor o tempo e o custo necessário para o processo de polimento.

A forma dos cavacos encontrados foi a esperada e a ideal, pois não ocasionaram problemas com o seu controle e sua quebra (sem emaranhados).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Curitiba - Sede Ecoville, ao Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul – Rau e à empresa WEG Equipamentos Elétricos S.A., pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Batista, M.F. *et al.*, 2006. *Estudo da Rugosidade de Superfícies Planas Usinadas por Fresas de Topo Esférico*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Cao, Q.Y. *et al.*, 2016. The effect of curvature radius of sculptured surface on finish milling tool path selection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, n. 9-12, p. 3349-3357. Springer Science and Business Media LLC <<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9273-1>>.
- Çakir, A. *et al.*, 2015. The effect of minimum quantity lubrication under different parameters in the turning of AA7075 and AA2024 aluminium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 84, n. 9-12, p. 2515-2521. Springer Science and Business Media LLC <<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7878-4>>.
- Chen, Xiao *et al.*, 2013. Investigation on the chip formation concerning tool inclination angles in ball end milling of H13 die steel. *Proceedings of the 3rd Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, p. 337-355. SAGE Publications <<http://dx.doi.org/10.1177/0954405413500663>>.
- Daymi, A., *et al.*, 2009. Influence of workpiece inclination angle on the surface roughness in ball end milling of the titanium alloy Ti-6Al-4V. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 35.1, p. 79-86.
- Dewes, R.C; Aspinwall, D.K., 1997. A review of ultra-high-speed milling of hardened steels. *Journal Of Materials Processing Technology*, Vol. 69, n. 1-3, p. 1-17. Elsevier BV <[http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(96\)00042-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(96)00042-8)>.
- Dong, Y. *et al.*, 2021. Modeling and Analysis of Micro Surface Topography from Ball-End Milling in a Trochoidal Milling Mode. *Micromachines*, Vol. 12, n. 10, p. 1203. MDPI AG <<http://dx.doi.org/10.3390/mi12101203>>.
- Emuge Franken (Germany). Milling Technology: cold-air nozzle. 1 May 2022 <https://dam.precisioontools.media/export/Hybris_Download_original/104865.pdf>.
- Exair (Canadá). Vortex Tubes: Applications. 13 Ago. 2022 <<https://www.exair.com/vt.html>>.
- Guhring (Alemanha). PowerMill: Fresamento linha econômica. 31 jul. 2022 <<https://www.guhring.com.br/arquivos/downloads/7d9a6092451a82b5409673194eaefd27-arquivo.pdf>>.
- Gupta, U.S. *et al.*, 2013. Thermodynamic Analysis of Counter Flow Vortex Tube. *International journal of engineering research and technology*, Vol. 2, n. pag. SSN: 2278-0181.
- Gürkan, D. *et al.*, 2020. Vorteks soğutma yönteminin talaşlı imalat yöntemleri ve kesme parametrelerine göre incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, p. 730-745. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji <<http://dx.doi.org/10.29109/gujsc.727746>>.
- International Organization for Standardization, 1993. *ISO 3685:1993: tool-life testing with single-point turning tools*. Suíça, 2ª edição. 48 p.
- Kumar, S.; Gandotra, S., 2020. Effect of cooling air on machining performance during hard turning. *Proceedings of Materials Today* <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.263>>.
- Nex Flow (Canadá). Vortex Tubes. 13 Ago. 2022 <<https://www.nexflow.com/vortex-tubes/>>.
- Oliveira, A.J. e Diniz, A.E., 2009. Tool life and tool wear in the semi-finish milling of inclined surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, n. 14, p. 5448-5455 <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.04.022>>.
- Sai, L. *et al.*, 2018. An approach to modeling the chip thickness and cutter workpiece engagement region in 3 and 5 axis ball end milling. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 34, p. 7-17 <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.018>>.

- Sen, B. *et al.*, 2019. Eco-Friendly Cutting Fluids in Minimum Quantity Lubrication Assisted Machining: a review on the perception of sustainable manufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, [S.L.], Vol. 8, n. 1, p. 249-280 <<http://dx.doi.org/10.1007/s40684-019-00158-6>>.
- Sharma, T.K. *et al.*, 2016. Numerical Analysis of a Vortex Tube: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 24, n. 2, p. 251-280 <<http://dx.doi.org/10.1007/s11831-016-9166-3>>.
- Singh, R., 2022. Advances in manufacturing technology: computational materials processing and characterization. Crc Press., Boca Raton, Flórida.
- Toh, C.K., 2004. A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 152, n. 3, p. 346-356, <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.382>>.
- Villares Metals. Aços para trabalho a quente. 24 abr. 2022 < <https://www.villaresmetals.com.br/pt/produtos/acos-ferramenta/trabalho-a-quente/VH13ISO>>.
- Vortec. Vortex Tube Short Course: air movement in a vortex tube. 12 Ago. 2022 <<https://www.vortec.com/vortex-tube-short-course>>.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

INFLUENCE OF THE USE OF COLD AIR ON THE MILLING PROCESS OF AISI H13 STEEL WITH BALL NOSE END MILL

Alexandre Venturi

Milton Luiz Polli

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 – Cidade Industrial
alexandre.venturi92@gmail.com
polli@utfpr.edu.br

Gil Magno Portal Chagas

Instituto Federal de Santa Catarina, Rua dos Imigrantes, 445 – Rau, Jaraguá do Sul – SC
gilchagas@ifsc.edu.br

Abstract. The optimization of machining processes has been explored by the metallurgical industries with the objective to increase their productivity, reduce their manufacturing costs and environmental problems to remain competitive in the market. Milling is one of the most used machining processes and of great importance in the machining of parts with complex geometries. These geometries are very common in molds and dies and among the machining tools most used for their manufacture, ball nose end mills stand out, because they are adaptable to machining these geometries. AISI H13 steels are materials widely used in molds and dies because they have some characteristics such as resistance to exposure to high temperatures, high toughness and resistance to thermal fatigue. For these applications these steels are heat treated and their hardness can be between 45 and 64 HRC. However, due to these characteristics, it is common for difficulties to arise in the machining process of these steels, such as high heating at the chip-tool interface and tool excessive wear. Based on this, this work purpose to analyze the influence of the use of cold air on the quality of the machined surface and the life ball nose end mill coated in TiAlN in the 5-axis milling of AISI H13 steel hardened on inclined surfaces. Tool wear and machining temperatures with different cooling systems were analyzed. The refrigeration systems used were compressed air and cold air applied by vortex tube. The cutting parameters stayed fixed. Thermocouples were inserted into the workpiece for temperature analysis below the machined surface. The results show that the lowest values of roughness and machining temperatures occurred with cold air use. The tool used had a good performance under the conditions used, because there were not problems of severe wear and difficulty in controlling chip breaking.

Keywords: Hard milling; Ball nose end mill; Vortex tube; AISI H13.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.