

AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DA LIGA Ti5553 COM FERRAMENTAS DE PCD E CBN UTILIZANDO DIFERENTES MODOS DE LUBRIFRIGERAÇÃO

Rodrigo Gonçalves dos Santos, PUC-PR, rodrigo.santos13@pucpr.edu.br

Ricardo Diego Torres, PUC-PR

Fred Amorim, PUC-PR

Resumo. Devido à sua relação tensão máxima/peso ser superior às outras ligas de titânio, a liga Ti5553 tem sido muito utilizada em componentes aeronáuticos de responsabilidade, como trens de pouso e estrutura das asas de aeronaves de grande porte. Entretanto, devido à sua baixa condutividade térmica e a manutenção de suas propriedades mecânicas em altas temperaturas, apresenta baixa usinabilidade. Vários estudos apontam para a pior usinabilidade da liga Ti5553 em relação da liga Ti64, que é a mais utilizada atualmente. Desta forma, este plano de trabalho analisa o comportamento da liga Ti5553 no torneamento, aplicando vários tipos de lubrificação e utilizando ferramentas de PCD e CBN com alta velocidade de corte. Serão abordados os diferentes aspectos da influência da lubrificação sobre a usinabilidade desta liga – criogênico, HPC e MQL. No mesmo sistema de aplicação MQL, será utilizado três tipos de NMQLs, adicionados nanotubos de carbono, cobre esferoidal e a mistura destas duas nanopartículas.

Palavras-chave: usinabilidade, Ti5553 e lubrificação.

1. INTRODUÇÃO

A liga Ti5553 (5Al-5Mo-5V-3Cr-0,5Fe) apresenta superiores propriedades mecânicas em relação a maioria das ligas de titânio, baixa condutividade térmica (1/6 em relação aos aços), alta reatividade química em altas temperaturas e baixo módulo de elasticidade, e desta forma, apresenta uma pobre usinabilidade. Entretanto, vem substituindo, na indústria aeroespacial, a tradicional liga Ti6Al4V que é responsável por mais de 50% do total de componentes produzidos na atualidade dentre as ligas de titânio (Arrazola *et al.* 2009). Dentre os componentes aeroespaciais, o Ti5553 tem maior aplicação na fabricação de trens de pouso de aviões de grande porte, pois possui alta resistência a corrosão e a fadiga. Segundo vários autores, incluindo Fanning (2005), a liga Ti5553 é uma moderna liga de titânio, apresentada em 1997 resultado da pesquisa conjunta da Boeing e VSMPO (maior produtor de titânio da Rússia), proveniente da modificação da liga russa quase-beta VT-22 (Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe), com objetivo de fabricar componentes capazes de obter maior profundidade de endurecimento por tratamento térmico e melhores propriedades mecânicas, sendo que o Ti5553 tem uma alta tensão máxima (em torno 1250 MPa), dureza e maior resistência a fadiga, produzindo componentes mais finos e leves, o que é de grande interesse da indústria aeroespacial. Boyer *et al.* (2005) comenta que o estudo da empresa Boeing para produzir seus trens de pouso para a aeronave 787, propôs a alteração da liga quase-beta Ti-10V-2Fe-3Al (Ti1023) para o Ti5553, sendo que esta substituição ocorreu devido à maior capacidade de endurecimento e maiores propriedades mecânicas do Ti5553. Desta forma, devido às características mecânicas desta liga é possível construir aeronaves mais leves e com maior eficiência e consumo. Na Tabela (1) é possível comparar algumas propriedades mecânicas do Ti5553 em relação ao Ti64.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do Ti6Al4V e Ti5553 (Arrazola *et al.* 2009).

Ligas de Titânio	Composição Química (%)						Al equiv. ^a (%)	Mo equiv. ^b (%)	Transus beta (°C)	TYS (MPa)	UTS (MPa)	Along. (%)	Dur. HB ±5	Tensão 400 °C (MPa)
	Al	Mo	V	Fe	Cr	Zr								
Ti64	6	-	4	-	-	-	7	2.5	995	900	1000	18	241	550
Ti5553	5	5	5	0.3	3	-	5	19	860	1050	1200	10	270	860

^a Al equiv. perc. peso (%) = $Al + Sn/3 + Zr/6 + 10(O^2 + N^2)$.

^b Mo equiv. perc. peso (%) = $Mo + 2W3 + Nb/3 + 3(Fe + Cr)$.

Devido ao aumento do emprego desta liga na indústria e a sua baixa usinabilidade, é de fundamental importância o estudo dos processos de usinagem deste material visando obter peças com superior qualidade e menor custo de produção. Martínez *et al.* (2019) comenta que o estudo da usinabilidade do Ti5553 ainda não é tão abrangente quanto aos já realizados para o Ti64. Segundo Nouari *et al.* (2013), o titânio é muito reativo quimicamente e tende a soldar-se na superfície das ferramentas de corte, o que leva a formação do desgaste tipo cratera e ao lascamento. Desta forma, este plano de trabalho visa estudar a usinabilidade da liga Ti5553 analisando a integridade da superfície usinada, o desgaste de ferramentas, os esforços de corte e a formação de cavaco com alta velocidade de corte, utilizando materiais ultraduros de ferramentas de corte e aplicando diversos meios lubrificantes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Comparando com a liga Ti6Al4V, Sadik *et al.* (2018) atestou que a usinabilidade do Ti5553 é cerca de 40% pior, utilizando ferramenta de metal duro. Na mesma direção e aplicando uma velocidade de corte de 90 m/min, Arrazola *et al.* (2009) detectou que a liga Ti5553 apresentou pior usinabilidade que o Ti6Al4V, em torno de 56%, utilizando como critério Vb como fim da vida da ferramenta. A busca da indústria aeroespacial para o aumento da produtividade e redução dos custos levou a utilização de materiais mais avançados de ferramentas de corte, como os ultraduros PCD e CBN. Estas ferramentas apresentam a capacidade de manter suas propriedades mecânicas em altas temperaturas, admitindo maiores velocidades de corte, contudo, tem um custo mais elevado em relação ao metal duro, sendo necessário garantir a maior produtividade. Um fator importante no desempenho do torneamento da liga Ti5553, são os meios lubrificantes, pois devido à baixa condutividade térmica deste material, são geradas altas temperaturas de corte e cavacos do tipo cisalhados devido o que é prejudicial a ferramenta. Dentre os parâmetros que definem a usinabilidade de um material o desgaste de ferramenta e a integridade da superfície usinada terão destaque neste resumo expandido.

2.1 Integridade da superfície usinada

A integridade da superfície da peça, pode ser caracterizado pela precisão dimensional, rugosidade, microdureza e tensões residuais geradas no material após a usinagem, e tem grande influência sobre a resistência a fadiga de uma peça, uma vez que os componentes aeroespaciais são submetidos a ciclos térmicos e de carregamentos intermitentes.

No estudo de Kaynak *et al.* (2018), a aplicação de HPC no Ti5553 atingiu maior rugosidade média devido às marcas de avanço geradas pela ferramenta. Estas marcas também apareceram utilizando a refrigeração aplicada de modo convencional. O melhor desempenho referente a rugosidade da superfície da peça foi através da aplicação de MQL, atribuído ao maior desgaste na ponta da ferramenta, que alterou a geometria da aresta de corte e aumento do raio de ponta. A topografia da peça usinada com MQL apresentou a adesão de pequenas partículas provenientes da formação de aresta postiça de corte, que se desprenderam da ferramenta e aderiram na peça. Bouchnak *et al.* (2015) utilizando HPC (*High Pressure Coolant*) e variando as pressões de aplicação, encontraram melhores resultados de rugosidade média e total com aplicação de fluido a maiores pressões - acima de 20 MPa.

Com o amolecimento superficial (*softening*) do Ti5553, devido às altas temperaturas geradas durante a usinagem, Kaynak *et al.* (2018) observou uma pequena redução da microdureza superficial das peças entre 8 a 10%. Por outro lado, Liu *et al.* (2022), aplicando fluido criogênico, HPC e corte a seco com uma velocidade de corte de 60 m/min, identificou o aumento de 20% na microdureza superficial. Isto vai de encontro com os resultados de Filho *et al.* (2023), que testou ferramentas de PCD novas e desgastadas a 200 m/min de velocidade de corte verificou o aumento da microdureza superficial em ambas as ferramentas, porém mais fortemente na ferramenta desgastada. Aplicando MQL como fluido de corte, a microdureza aumentou menos do que quando aplicado HPC e refrigeração em abundância.

Na análise das tensões residuais da superfície realizada por Bouchnak *et al.* (2015) utilizando uma Vc de 50 m/min, houveram maiores tensões residuais de compressão na superfície da peça usinada aplicando várias pressões de HPC e lubrificação convencional em relação ao torneamento a seco do Ti5553 (-700 MPa contra -400 MPa), sendo que na subsuperfície os resultados foram similares. Do mesmo modo, Filho *et al.* (2023) observou a tensão residual superficial compressiva em maior grau (-386 MPa) quando aplicado HPC com um a ferramenta de PCD desgastada e -7 MPa utilizando ferramenta de PCD desgastada e aplicando MQL. As forças compressivas são devido à alta taxa de deformação sofrida pela superfície usinada. Vale lembrar que a tensão residual superficial compressiva é preferível em se tratando de resistência a fadiga de um componente.

2.2 Desgaste de Ferramentas

É unânime entre os vários autores a pior usinabilidade da liga Ti5553 em relação as principais ligas de titânio. Desta forma, no torneamento a seco realizado por Kaynak *et al.* (2018), foi observado a formação da aresta postiça de corte em todas as ferramentas, independente da velocidade de corte e avanço, sendo que aplicando maiores profundidades de corte (1,4 e 2 mm) ocorreu o lascamento da ferramenta de metal duro. Devido o rápido desgaste das ferramentas utilizando maiores velocidades e profundidades de corte, o autor concluiu que velocidades de corte acima de 120 m/min são impraticáveis para o desgaste moderado do Ti5553. Analisando o material aderido na superfície de saída da ferramenta, Arrazola *et al.* (2009) identificou, além do titânio, a presença de TiC proveniente da difusão do carbono da ferramenta de metal duro. Com o aumento do avanço da ferramenta, Ayed *et al.* (2018) encontrou a formação do desgaste tipo entalhe na aresta de corte usinando o Ti5553, porém os mecanismos de desgaste que governaram o ensaio foram a adesão e a abrasão, que levou a formação de cratera na superfície de saída da ferramenta.

Os fluidos de corte têm grande importância nos processos de usinagem, principalmente nas ligas de titânio. Martínez *et al.* (2019) comenta que não deve ser utilizado o corte a seco para as ligas de titânio devido ao forte desgaste prematuro da ferramenta, reduzindo a qualidade superficial da peça usinada - apesar do corte a seco ser considerado o mais sustentável. Em seus estudos, Tascioglu *et al.* (2019) comenta que devido à baixa condutividade térmica do Ti5553, a dissipação do calor durante a usinagem é dificultada, o que gera altas temperaturas e maior desgaste da ferramenta. Nos

ensaios realizados variando o método de lubrificação no torneamento, foi identificado que para a operação de desbaste com velocidade de corte de 120 m/min, o HPC obteve 1300 mm de comprimento usinado, enquanto aplicando fluido criogênico foi de 540 mm. A seco, MQL e fluido em abundância obtiveram cerca de 180 mm. Foi visualizado a forte adesão de material na aresta de corte, formando aresta postiça, principalmente na usinagem a seco, MQL e fluido em abundância. A liga Ti5553 apresenta elementos de liga que formam partículas de segunda fase que favorecem a formação da aresta postiça de corte, além do forte encruamento durante o corte. Liu *et al.* (2021) aplicou LN₂ no ensaio de torneamento do Ti5553 e também encontrou a adesão e formação da aresta postiça de corte na ferramenta de metal duro aplicando vários parâmetros de corte, devido à forte reatividade química desta liga. O LN₂ apresentou melhores resultados quando aplicado em uma menor profundidade de corte. Ayed *et al.* (2018) e Arrazola *et al.* (2009) concluíram que a utilização do fluido em abundância na usinagem do Ti5553 é viável no torneamento somente até uma velocidade de corte de 45 m/min, pois a vida da ferramenta se reduz muito rapidamente acima deste parâmetro. Filho *et al.* (2023) observou menor vida das ferramentas de PCD e CBN, em relação ao HPC, torneando a 200 m/min de velocidade de corte, aplicando MQL e fluido em abundância, que devido à maior temperatura de corte, gerando oxidação nas ferramentas. A velocidade de corte de 150 m/min foi considerada como crítica para a usinagem da liga Ti5553 por Kaynak *et al.* (2018), pois acima desta velocidade os esforços de corte e o desgaste da ferramenta são muito altos, inviabilizando o processo.

Em um ensaio de torneamento do Ti5553 com ferramentas de PCD realizado por Sadik *et al.* (2019) em uma condição de acabamento, foram testadas o desempenho de três tipos de PCDs. Os resultados foram similares no menor parâmetro de corte (V_c de 100/min e avanço de 0,1 mm/volta). O desgaste abrasivo de flanco (V_b) e de entalhe foram relativamente baixo em todas as ferramentas de PCD, não sendo os principais mecanismos de desgaste quando os parâmetros de corte são reduzidos. Entretanto, com uma velocidade de corte de 200 m/min e a partir do avanço de 0,15 mm/volta, foi verificado que o desempenho da ferramenta caiu rapidamente, sendo que o desgaste abrasivo aumenta e a presença do entalhe e da cratera ocorrem mais pronunciadamente determinando o fim de vida da ferramenta, quando ainda não havia atingido V_b de 0,3 mm. A cratera formada apresentou a forma de sulco na superfície de saída da ferramenta com a topologia formada por picos e vales, sendo que a menor quantidade de material perdido da ferramenta foi no grau de PCD com menor granulometria e maior quantidade de cobalto, que apresentou menor área de contato cavaco-ferramenta reduzindo os esforços e temperatura de corte. O cobalto do PCD funciona como ligante e é difundido da ferramenta deixando os grãos de diamante desprotegidos, gerando a remoção destes grãos durante a usinagem gerando a abrasão pelo arraste dos mesmos – adesão/*attrition*. Desta forma, o PCD com maior percentual de cobalto e menor tamanho de grão apresentou menor desgaste tipo cratera. Na região final da cratera do PCD foi possível observar uma parte mais lisa e com traços de material da peça aderido. Foi detectada a presença de titânio aderido e TiC proveniente da difusão de carbono da ferramenta, além do carbono proveniente da grafitação do diamante. Estes fenômenos induziram a formação da cratera e perda de massa da superfície de saída da ferramenta.

O controle da temperatura de corte e a utilização de materiais de ferramentas ultraduros podem melhorar significativamente o desempenho do processo de usinagem da liga Ti5553.

3. METODOLOGIA

Os ensaios de torneamento da liga de titânio Ti5553 serão realizados no laboratório de usinagem da PUC-PR (LAUS) em Curitiba e no laboratório de usinagem da McMaster Manufacturing Research Institute (MMRI) em Hamilton no Canadá. Serão utilizados 2 corpos de prova de Ti5553 cilíndricos e com diâmetro 63,5 mm e comprimento 254 mm, fornecidas pela McMaster University. O material deverá ser caracterizado no Laboratório de Ensaios e Caracterização de Materiais da PUC-PR (LACEM), como recebido, visando comprovar suas principais propriedades mecânicas, dentre elas sua microestrutura, microdureza e composição química.

Os testes de usinagem com a aplicação de LN₂ como fluido de corte e ferramentas de PCD e CBN serão realizados no LAUS. Os outros testes serão realizados no MMRI e utilizaram HPC como fluido de corte na comparação do desempenho das ferramentas de PCD e CBN. Também serão estudados 3 tipos de NMQL e o MQL no MMRI, utilizando como nanopartícula o nanotubo de carbono multi paredes (MWCNT - ϕ_{ext} 30-80 nm, ϕ_{ext} 5-15 nm e comprimento <10 μ m), cobre esferoidal (ϕ 50 nm) e a utilização dos dois nano particulados no terceiro fluido, todos com uma concentração de 0,5%. Os ensaios com MQL e NMQL serão realizados somente utilizando a ferramenta de PCD. Na figura (1) é apresentado o esquema do planejamento geral dos ensaios. Os níveis dos fatores independentes do processo foram definidos com base na revisão bibliográfica pertinente sobre a usinagem do Ti5553. No esquema também é possível visualizar as variáveis dependentes do processo.

Os parâmetros independentes de entrada do ensaio foram definidos com base no desempenho do processo que tange a produtividade e integridade superficial obtidos no torneamento da liga Ti5553. Logo, buscou-se um processo de acabamento - a_p : 0,25 mm; f : 0,125 mm/volta e V_c : 300 m/min. A velocidade de corte foi definida com base no ensaio piloto realizado previamente e discutido abaixo.

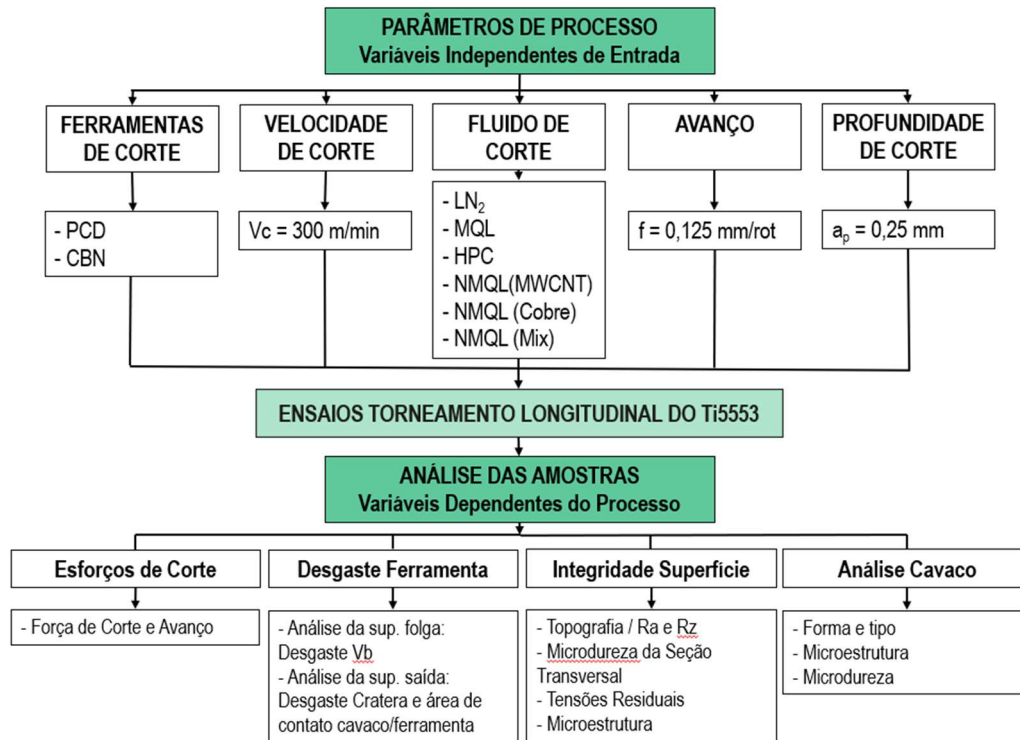


Figura 1 - Esquema geral de ensaios.

3.1 Teste piloto – definição da velocidade de corte

Um dos objetivos deste trabalho é analisar o comportamento da liga Ti5553 em alta velocidade de corte, visando o aumento da produtividade. Entretanto, a velocidade de corte está intrinsicamente ligada ao desgaste da ferramenta. Para isto, foi utilizado o inserto de CBN Kennametal CNGA120408S01025MT - KB5630 com alto teor de CBN. O porta-ferramenta utilizado foi o Sandvik PCLNL 16 4DHP com ângulo de posição de 95° e ângulo de folga de 6°, resultando em um ângulo de saída de -6°. Parâmetros de avanço e profundidade de corte foram os mesmos descrita na Fig. (1).

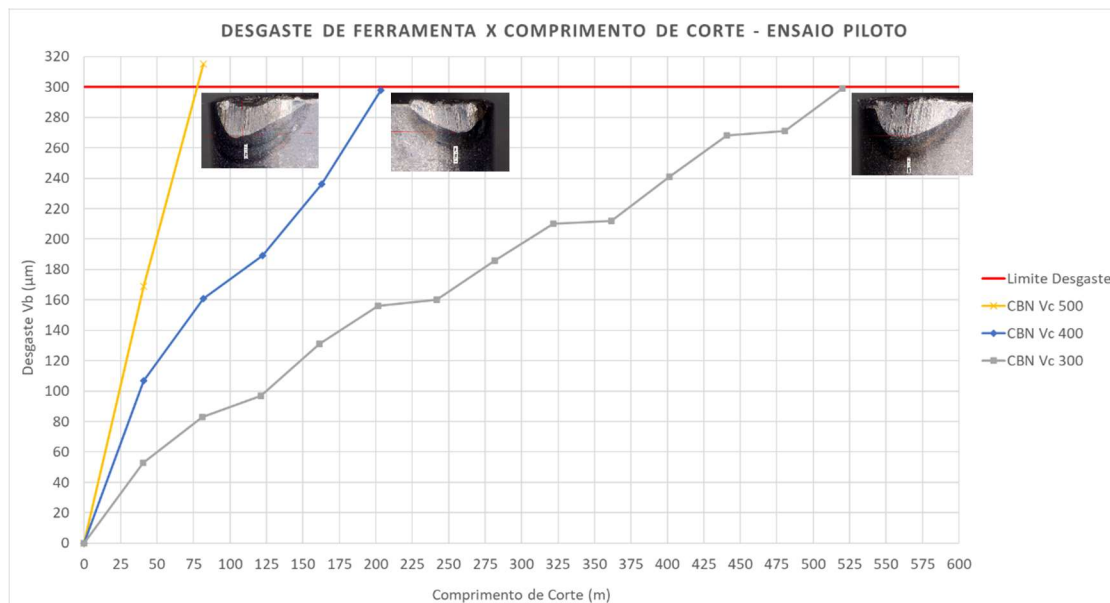


Figura 2 - Curvas de desgastes das ferramentas de CBN no pré-teste para definição da velocidade de corte.

As velocidades de corte aplicadas no ensaio piloto foram definidas em um patamar acima ao já descrito na literatura. Em torno de 80% dos pesquisadores aplicaram velocidades de corte abaixo de 90 m/min no torneando o Ti5553, devido à baixa usinabilidade desta liga. Utilizando ferramentas de PCD, por exemplo, Sadik *et al.* (2019) utilizou velocidades de corte 100, 150 e 200 m/min, avanços 0,10, 0,15 e 0,20 mm/volta, profundidade de corte de 0,50 mm e fluido de corte

HPC a pressão de 9 MPa. Filho *et al.* (2023) aplicou 200 m/min utilizando ferramentas de CBN e PCD, aplicando HPC e 0,125 mm/volta de avanço e 0,25 mm de profundidade de corte.

Buscando analisar o comportamento das ferramentas de PCD e CBN quanto a sua integridade com a maior produtividade, foi trabalhado com as velocidades de corte de 300, 400 e 500 m/min no ensaio piloto. Na Figura (2) é possível identificar a curva de desgaste e fotos dos inserts desgastados. O critério de fim de vida foi o Vb 0,3 mm e o fluido de corte foi a emulsão aplicada a uma pressão de 7 MPa (HPC). O desgaste apresentado aplicando velocidades de corte de 400 e 500 m/min foram muito agressivos, sendo impraticáveis em um ambiente industrial. Assim, foi optado na utilização da velocidade de corte de 300 m/min para a realização dos ensaios conforme apresentado na Fig. (1).

4. CONCLUSÕES

A principal conclusão do ensaio piloto realizado é a pobre usinabilidade da liga Ti5553, não permitindo altas velocidades de corte, mesmo utilizando materiais ultraduros de ferramenta. Desta forma, para o plano de trabalho, será utilizado 300 m/min de velocidade de corte, o que está acima das velocidades pesquisadas até o momento para esta liga.

As principais conclusões apresentadas pela revisão bibliográfica apontam para a grande influência do desgaste de ferramenta e a aplicação de fluidos de corte sobre integridade da superfície usinada e a não recomendação do corte a seco para esta liga, sendo que o HPC o melhor sistema de lubrificação em termos de desgaste de ferramenta.

5. REFERÊNCIAS

- Arrazola, P., Garay, A., Iriarte, L., Armendia, M., Marya, S., Maître, F., 2009, "Machinability of Titanium Alloys (Ti6Al4V and Ti555.3)", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 2223-2230.
- Ayed, Y., Germain, G., High-pressure Water-jet-assisted Machining of Ti555-3 Titanium Alloy: Investigation of Tool Wear Mechanisms", 2018, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 845-856.
- Bouchnak, T., Germain, G., Morel, A., Furet, B., "Influence of High-Pressure Coolant Assistance on the Machinability of the Titanium Alloy Ti555-3", 2015, *Machining Science and Technology*, pp. 134-151.
- Boyer, R., Briggs, R., "The Use of b Titanium Alloys in the Aerospace Industry", 2005, *Journal of Materials Engineering and Performance*: 14, pp. 681-685.
- Fanning, J., 2005, "Properties of TIMETAL 555 (Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-0.6Fe)", *Journal of Materials Engineering and Performance*: 14, pp. 788-791.
- Filho, T., He, Q., Paiva, J., Veldhuis, S., "An analysis of Different Cutting Strategies to Improve Tool Life When Machining Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr Alloy", 2023, *Journal of Manufacturing Processes*: 102, pp. 50-66.
- Kaynak, Y., Gharibi, A., Yilmaz, U., Koklu, U., Aslantas, K., "A Comparison of Flood Cooling, Minimum Quantity Lubrication and High-pressure Coolant on Machining and Surface Integrity of Titanium Ti-5553 Alloy", 2018, *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 503-512.
- Liu, E., Wang, R., Zhang, Y., An, W., "Tool Wear Analysis of Cutting Ti-5553 with Uncoated Carbide Tool Under Liquid Nitrogen Cooling Condition Using Tool Wear Maps", 2021, *Journal of Manufacturing Processes*: 68, pp. 877-887.
- Liu, E., Wang, R., Zhang, Y., Lan, C., "Surface Integrity Analysis of Ti-5553 Under Different Cooling Strategies", 2022, *Ferroelectrics*: 593, pp. 51-62.
- Martinez, E., Miguel, V., Martinez, A., Manjabacas, M., Coello, J., "Sustainable Lubrication Methods for the Machining of Titanium Alloys: An Overview", 2019, *Journal of Materials Science and Engineering*: 12, 3852, pp. 1-22.
- Nouari, M., Makich, H., "Experimental Investigation on the Effect of the Material Microstructure on Tool Wear When Machining Hard Titanium Alloys: Ti-6Al-4V and Ti-555", 2013, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, pp. 259-269.
- Sadik, M., Coronel, E., Lattemann, M., "Influence of Characteristic Properties of PCD Grades on the Wear Development in Turning of β -titanium Alloy (Ti5Al5V5Mo3Cr)", 2019, *Wear*, pp. 1694-1702.
- Sadik, M., Lattemann, M., Garcia, J., "Specific Carbide Substrate Design to Enhance Tool Performance in Machining of Ti5553", 2018, 8th CIRP Conference on High Performance Cutting, pp. 598-601.
- Tascioglu, E., Gharibi, A., Kaynak, Y., "High Speed Machining of Near-beta Titanium Ti-5553 Alloy Under Various Cooling and Lubrication Conditions", 2019, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.

6. AGRADECIMENTOS

PPGEM – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – PUC-PR.

McMaster Manufacturing Research Institute (MMRI) - McMaster University.

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O autor é o único responsável pelas informações incluídas neste trabalho.