

Torneamento de Alumínio com Ferramentas de PCD Texturizadas: Comparação entre Resultados Simulados e Experimentais

Leonardo Carvalho Aires¹

<https://orcid.org/0009-0002-9142-6084>

Felipe Chagas Rodrigues de Souza²

<https://orcid.org/0000-0003-4446-3077>

RESUMO

O seguinte trabalho acadêmico busca simular o processo de torneamento do alumínio, utilizando-se ferramentas de corte texturizadas de alta resistência. Objetiva-se comparar os resultados obtidos com dados de processos de usinagem reais realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU), a fim de estabelecer a eficácia do *software* de simulação para o processo sob estas condições. Para tanto, procede-se às simulações com ferramentas texturizadas (canais perpendiculares à aresta principal de corte) e ausentes de texturas (lisas) em ligas de Alumínio. Foi utilizado o software Third Wave Systems AdvantEdge™ para as simulações. Foram criados quatro tipos diferentes de texturas, com diferentes larguras e profundidades dos sulcos criados pela texturização, variou-se velocidade de corte e profundidade de corte, totalizando oito simulações texturizadas. Após a realização das simulações, os resultados sobre as forças de usinagem foram tratados e expostos em formato de gráficos de funções e imagens planificadas pelo *software* auxiliar Tecplot®, recomendado pela criadora do *software* de simulação, e então comparados com experimentos reais em mesmas condições. Desse modo, observa-se que o *software* possui correlação com a realidade, mas não produz informações exatas às observadas em laboratório, o que permite concluir que as simulações sob as condições especificadas podem ser feitas para previsões de comportamentos, mas não podem ser utilizadas para predições específicas de valores normais de forças de usinagem.

Palavras-chave

Torneamento; Usinagem; Texturização; Simulação.

Submetido em: 11/01/2025 – Aprovado em: 31/01/2025 – Publicado em: 31/01/2025

1 Graduando, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, leonardo.aires@ufu.br.

2 Doutorando, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, felipechagas@ufu.br.



Aluminum Turning with Textured PCD Tools: Comparison Between Simulated and Experimental Results

ABSTRACT

The following academic work aims to simulate the aluminum turning process using high-strength textured cutting tools. The objective is to compare the results obtained with data from real machining processes carried out at the Laboratory of Teaching and Research in Machining (LEPU-UFU), in order to establish the effectiveness of the simulation software for the process under these conditions. To this end, simulations were carried out with textured tools (flutes perpendicular to the main cutting edge) and without textures (smooth) in aluminum alloys. The Third Wave Systems AdvantEdge™ software was used for the simulations. Four different types of textures were created, with different widths and depths of the grooves created by texturing, and the cutting speed and depth of cut were varied, totaling eight textured simulations. After the simulations were performed, the results on the machining forces were processed and displayed in the form of function graphs and planned images using the auxiliary software Tecplot®, recommended by the creator of the simulation software, and then compared with real experiments under the same conditions. Thus, it can be seen that the software correlates with reality, but does not produce information that is exact to that observed in the laboratory, which allows us to conclude that the simulations under the specified conditions can be used to predict behaviors, but cannot be used for specific predictions of normal values of machining forces.

Keywords

Turning; Machining; Texturing; Simulation.

1 INTRODUÇÃO

O processo de usinagem envolve o uso de ferramentas de corte, como brocas, fresas, tornos, entre outras, para remover o material em excesso da peça de trabalho. Essas ferramentas realizam cortes, furos, ranhuras e outros tipos de operações, transformando a matéria-prima em uma peça acabada conforme as especificações desejadas. A usinagem é capaz de produzir peças de diferentes formas e tamanhos, desde peças simples até complexas, com alta precisão dimensional e acabamento superficial. Os processos de usinagem mais comuns incluem torneamento, fresamento, brochamento, furação, retificação e eletroerosão (FERRARESI, 1970).

Ao serem realizados os processos de usinagem, é comum a adição de aprimoramentos às ferramentas de cortes, como refrigeração, revestimento, tratamento térmico e texturização. A texturização envolve a criação de padrões e micro cavidades na superfície da ferramenta de corte. Esses padrões podem melhorar o desempenho da ferramenta de várias maneiras, como a redução do atrito, a melhoria da lubrificação, a promoção da quebra de cavacos e o controle do calor. A texturização pode ser realizada por meio de processos a laser, jateamento, eletroerosão ou processos químicos.

Dessa forma, ressalta-se que a texturização de ferramentas de corte envolve a criação de padrões ou micro cavidades na superfície da ferramenta. Esses padrões podem ter diferentes formas, como sulcos, ranhuras, pontos ou outros desenhos específicos. Cada tipo de textura tem um propósito específico e pode trazer benefícios distintos para o processo de usinagem (SHARMA; PANDEY, 2016) e (LIMA, 2005). A textura do tipo *groove*, utilizada neste trabalho, refere-se a sulcos ou ranhuras na superfície da ferramenta de corte. Esses sulcos podem ser lineares, helicoidais ou ter outras formas geométricas.

Esta geometria traz inúmeros benefícios, como a redução do atrito entre a ferramenta de corte e a peça em usinagem, que ocorre pela criação de canais de escape para os detritos gerados durante o corte, evitando que eles se acumulem na região de contato. Em consequência, a redução do atrito resulta em menos calor gerado e menor desgaste da ferramenta. A textura do tipo *groove* pode também atuar como um reservatório de fluidos de corte, melhorando a lubrificação na zona de corte. Os sulcos podem armazenar e distribuir de maneira mais eficiente o líquido refrigerante ou óleo lubrificante, reduzindo o atrito e o calor gerados durante o processo de usinagem. Além disso, a textura do tipo *groove* pode ajudar a reduzir as forças de corte aplicadas à ferramenta. Os sulcos atuam como canais de alívio, permitindo que o material removido durante o corte seja evacuado de forma mais eficiente, resultando em menor carga sobre a ferramenta, reduzindo o desgaste e a possibilidade de falhas prematuras. Finalmente, a textura do tipo *groove* pode ajudar a quebrar os cavacos formados durante o corte.

Os sulcos fornecem canais para que os cavacos se quebrem em pedaços menores, facilitando sua remoção da zona de corte. Isso contribui para evitar o emaranhamento dos cavacos e a formação de cavacos longos e indesejados, resultando em um processo de usinagem mais estável e uma maior vida útil da ferramenta. Estes benefícios da textura do tipo *groove* serão investigados e analisados neste trabalho, sendo comparados com experimentos reais e simulações de ferramentas com diferentes texturas e sem textura (DHAGE, et al., 2019).

Para mitigar os efeitos adversos de se realizar ensaios com corpo de prova e maquinário real, é possível ser feito o uso de simulações, com *softwares* especializados em reproduzir, o mais fielmente possível, as condições encontradas em testes reais (incluindo a geometria das texturas na ferramenta de corte) (MISHRA et al., 2018). Em primeira vista, a contribuição mais evidente deste método de ensaio é a redução quase total dos custos de materiais, dado o fato que as simulações não utilizam material algum para se concluir um teste de usinagem. De fato, o ambiente digital reduz os custos de material a zero, contribuindo muito para a otimização dos ensaios de processos de usinagem, permitindo ainda serem realizados muito mais testes, a custos demasiadamente menores. Assim, o presente estudo busca correlacionar os resultados corroborados em laboratórios com dados gerados a partir de simulações computadorizadas, com fins de aprimorar a capacidade de análise de resultados por meio de simulações computadorizadas, além da otimização temporal e financeira de futuros trabalhos, permitindo então que resultados demasiadamente discrepantes sejam descartados, sem haver a necessidade de gastos adicionais em recursos e tempo com processos de usinagem em laboratório.

O alumínio, material utilizado para ser torneado nesta simulação, foi escolhido por ser extremamente dúctil, ou seja, é capaz de sofrer maior quantidade de deformação antes de se romper, gerando cavacos contínuos (ALCAN, 1993). Devido às limitações do *software Advantage Edge™*, o alumínio simulado foi a liga 2024-T4, que é a que mais tem propriedades próximas da liga 2011-T4 que foi torneada em experimentos reais. A diferença entre essas ligas consiste basicamente na maior presença de Mg e Mn na liga 2024-T4, o que reduz um pouco sua usinabilidade e aumenta sua resistência mecânica.

Sobre a série 20XX-T4, o algarismo "2" indica que as ligas de alumínio têm o cobre (Cu) como principal elemento de liga. Essas ligas geralmente possuem alta resistência mecânica, mas são mais suscetíveis à corrosão, o que pode ser mitigado com tratamentos ou revestimentos. O algarismo "0" indica modificações dentro do grupo da liga original, sem modificações significativas em relação à composição básica da série 2000. O sufixo T4 refere-se ao tratamento térmico da liga. O "T" indica que o material passou por um processo de tratamento térmico. Especificamente, a designação T4 significa que o alumínio foi soluvelizado (aquecido até uma alta temperatura para dissolver os elementos de liga no material de base) e naturalmente envelhecido (deixado a temperaturas ambientes para que os elementos de liga precipitem e melhorem as propriedades mecânicas) (ALUMINUM ASSOCIATION, 2000).

O PCD, ou diamante policristalino, é um elemento compósito sintético produzido por sinterização, que o processo físico termicamente ativado baseado em fornecer resistência mecânica a um conjunto de partículas de um determinado material. Nesse processo, partículas de diamante são cuidadosamente selecionadas em condições de altas temperatura e pressão. Além disso, nos interstícios da matriz de diamante há a inserção de cobalto, catalisador do processo de sinterização. Por sua elevada dureza e resistência a compressão, além da sua condutibilidade térmica, o PCD é atualmente referência de material para se utilizar em processos de usinagem (CLARK; SEM, 1998). Assim, ferramentas de corte com PCD representam um avanço significativo na usinagem por conferir alta durabilidade para a ferramenta de corte.

A texturização de ferramentas de corte traz inúmeros benefícios para o processo de usinagem realizado, entre esses benefícios, vale citar a melhoria na lubrificação, resultante do armazenamento de fluido lubrificante nos sulcos dos padrões das texturas, reduzindo o atrito e desgaste da ferramenta. Além disso, há também o controle da formação de cavacos, onde as texturas facilitam a quebra dos cavacos em pedaços menores, facilitando sua remoção na zona de corte. Por fim, a texturização melhora o resfriamento e controla a temperatura por meio da facilitação do fluxo dos fluidos de corte, melhorando o resfriamento e dissipando o calor durante a operação, prolongando a vida útil da ferramenta.

2 METODOLOGIA

Durante toda a pesquisa, respaldada nos ensaios feitos em laboratório, foi utilizado o software AdvantEdge™, da empresa Third Wave Systems. O software utilizado é uma ferramenta de CAE, ou seja, Engenharia Auxiliada por Computador. Com a utilização da Análise de Elementos Finitos (FEA), essa ferramenta fornece informações equivalentes a pré-testes, economizando material, energia e tempo, visto que a simulação não necessita de supervisão de maneira integral, por não oferecer riscos de segurança ao maquinário e nem aos operadores.

Por ser um produto recente, a interface do programa AdvantEdge™ é compatível com muitas outras ferramentas de CAD, isto é, Desenho Assistido por Computador. Dessa forma, utilizou-se o programa SolidWorks™, da empresa Dassault Systèmes, para se desenhar as ferramentas de corte texturizadas e lisas. Assim, foram modeladas quatro peças com diferentes texturas, com orientação perpendicular à aresta de corte. Após a criação das ferramentas de corte com suas diferentes geometrias, foram realizadas as simulações sob duas condições diferentes para cada.

De início, criou-se uma peça retangular padrão do *software*, seu material sendo alumínio 2014-T4, possuindo 50 mm de comprimento. A ferramenta de corte selecionada no material PCD.

As diferentes texturas modeladas foram variadas com relação à distância entre as arestas da geometria texturizada, largura e profundidade dos sulcos da textura. As quatro variações criadas foram:

- a) distância entre as arestas de 120 μm , profundidade e largura iguais a 45 μm ;
- b) distância entre as arestas de 240 μm , profundidade e largura iguais a 45 μm ;
- c) distância entre as arestas de 120 μm , profundidade e largura iguais a 120 μm ;
- d) distância entre as arestas de 240 μm , profundidade e largura iguais a 120 μm ;

Dessa forma, é possível analisar como se comportam ferramentas com diferentes distâncias entre os *grooves*, quando simuladas em computador. As simulações foram todas realizadas com avanço de 0,2 mm por revolução e temperatura de 25 °C. Os parâmetros de simulação foram variados em duas características. São elas velocidade de corte, onde definiu-se altas rotações típicas para ferramentas de PCD (200 m/min e 400 m/min), e profundidades do corte de 2 mm e 3 mm. Ao final da criação dos parâmetros de simulação, foram totalizadas dez condições diferentes para o torneamento do alumínio simulado, oito texturizadas e duas sem textura, para controle. Desse modo, as simulações foram organizadas de acordo com o Quadro 1:

Quadro 1 - Condições de simulação e seu planejamento experimental.

Condição	Distância entre arestas (μm)	Profundidade e Largura (μm)	Velocidade de corte (m/min)	Profundidade de corte (mm)
1	120	45	400	2
2	240	45	400	3
3	120	120	400	3
4	240	120	400	2
5	120	45	200	3
6	240	45	200	2
7	120	120	200	2
8	240	120	200	3
9	Geometria lisa		200	3
10	Geometria lisa		400	2

Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

A partir das condições estipuladas, também foram realizados ensaios experimentais para validação do *software*. A medição das forças de usinagem foi realizada utilizando o Dinamômetro Kistler 9265B, pertencente ao LPU-UFU, que opera com base em cristais piezoelétricos. Para o processamento do sinal, foram utilizados um amplificador de sinal Kistler 5019A e uma placa de aquisição NIPCO6036E da National Instrument.

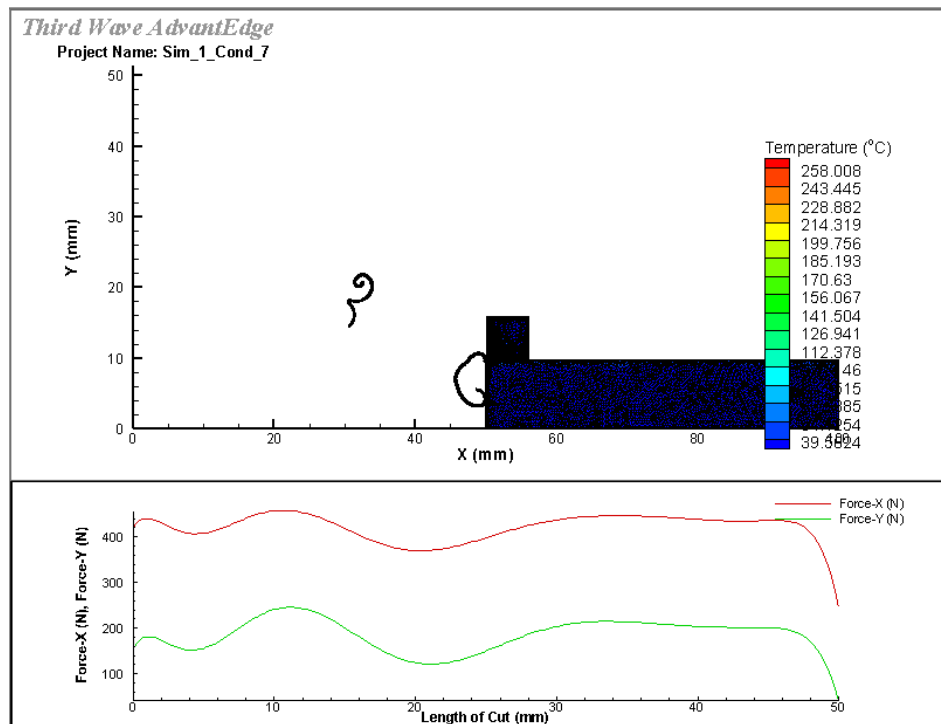
As duas componentes das forças de usinagem (força de corte F_x e força de avanço F_y) foram registradas a uma frequência de amostragem de 100 Hz, com um tempo de medição de 10 segundos por teste, resultando em 1000 pontos de dados para cada componente. Vale destacar que o processo de corte utilizado se aproxima muito de um corte ortogonal.

Tais experimentos conduzidos em laboratório, sem uso de simulação, estão mais bem detalhados no trabalho de (SOUZA, 2022), bem como seus resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Extraídas as informações do *software* de simulação, foi possível avaliar informações cruciais sobre a precisão e correlação do que foi simulado com os experimentos reais. Na Figura 1 temos um exemplo gráfico que o *software* plota para o usuário. O gráfico na parte inferior da imagem apresenta a variação das forças de usinagem no processo de torneamento de alumínio, sendo a força no eixo X (F_x) representada pela linha vermelha e a força no eixo Y (F_y) pela linha verde, ambas em função do comprimento do corte. Observa-se que a força F_x , correspondente à força de avanço, apresenta flutuações ao longo do processo, sugerindo variações na resistência do material ou oscilações da ferramenta. Já a força F_y , que está relacionada à penetração da ferramenta no material, exibe um comportamento menos intenso, mas ainda com variações perceptíveis. Essas oscilações podem ser atribuídas à interação da ferramenta com a peça, à formação do cavaco e às mudanças térmicas na interface de corte. No torneamento de alumínio, essas forças são críticas para a estabilidade do processo, pois variações excessivas podem indicar problemas como vibrações, desgaste acelerado da ferramenta ou irregularidades no acabamento superficial. A redução dessas oscilações pode ser alcançada por meio de ajustes nos parâmetros de corte, como a velocidade, o avanço e a geometria da ferramenta, garantindo um processo mais estável e eficiente.

Figura 1. Exemplo gráfico da simulação do software Advantage Edge™

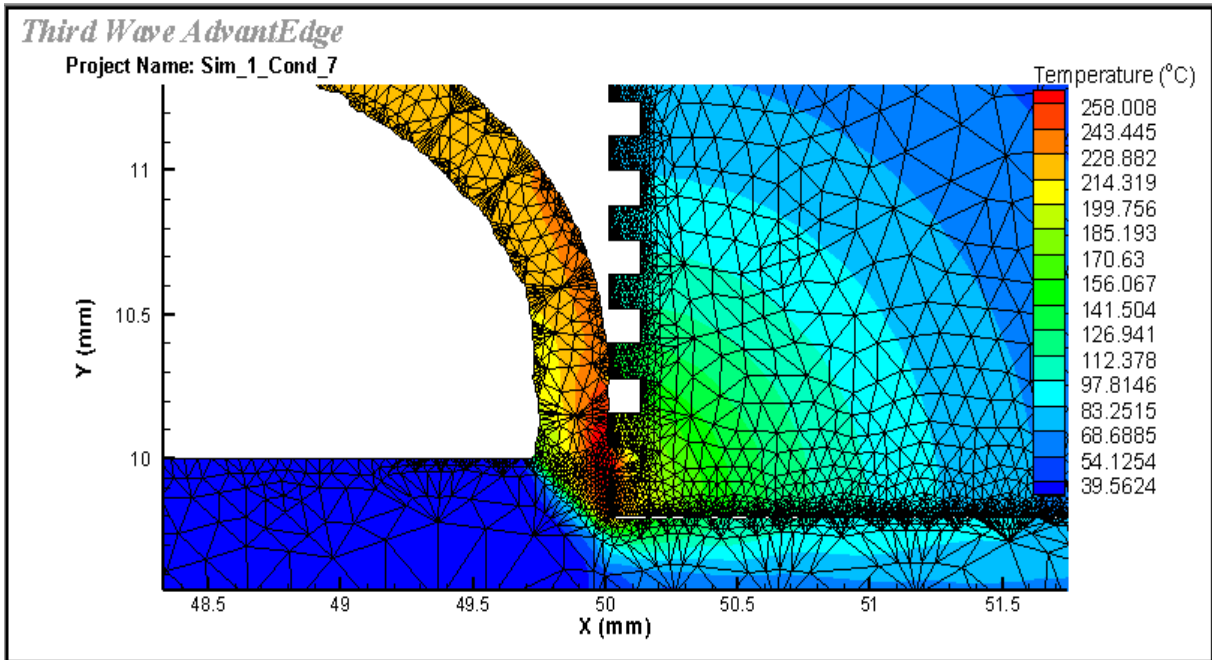


Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

A Figura 2 dá mais detalhes de um exemplo de uma superfície texturizada numa ferramenta de corte (2D) e uma análise térmica. A simulação térmica apresentada gerada, revela a distribuição de temperatura no processo de torneamento, evidenciando a influência do calor na interface entre a ferramenta e a peça trabalhada, bem como no cavaco. Observa-se como o cavaco ajuda a dissipar o calor gerado.

A concentração térmica mais elevada, indicada pelas cores quentes no gráfico, sugere um ponto crítico onde a dissipação de calor pode ser um fator determinante para o desempenho do processo. Esse aquecimento excessivo pode comprometer tanto a vida útil da ferramenta, devido ao desgaste acelerado, quanto a integridade do material usinado, podendo gerar tensões residuais e deformações indesejadas. Estratégias como a utilização de fluidos de corte, ajustes nos parâmetros operacionais e a escolha de materiais mais resistentes ao calor são fundamentais para otimizar o processo e garantir um equilíbrio entre eficiência produtiva e qualidade da peça final.

Figura 2. Exemplo de uma ferramenta com superfície de saída texturizada (vista em 2D)



Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

No Quadro 2, são mostrados os resultados obtidos, assim como a correlação entre simulação e experimentação, com torneamento estudos com o mesmo material e os mesmos parâmetros de corte. As condições não estão apresentadas no quadro foram descartadas devida a quebra de arestas na ferramenta de corte, as quais ocorreram tanto na simulação quanto nos experimentos.

Quadro 2 - Principais resultados. Fx representa a média da força de corte e Fy a média da força de avanço durante o torneamento

Tipos de Ferramenta	Velocidade de Corte (m/min)	Simulação Fx (N)	Experimento Fx (N)	Erro Fx (%)	Simulação Fy (N)	Experimento Fy (N)	Erro Fy (%)
Texturizadas	400	390	249	56,6	135	164	-17,7
Texturizadas	200	410	402	2,0	190	680	-72,1
Lisas	400	420	234	79,5	200	24	733,3

Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

Entre as geometrias de texturas utilizadas, não houve divergências significantes nos resultados, sendo então, as condições de corte no torneamento as principais variáveis que impactaram na comparação entre simulação e experimentação.

Para uma maior velocidade de corte (400 m/min), os resultados da força de corte (F_x) apresentaram grandes erros, caracterizados por baixa exatidão, porém alta precisão. Os resultados simulados apresentaram-se cerca de 1,7 vezes acima dos resultados experimentais. Já para uma menor velocidade (200 m/min) os resultados da força de corte (F_x) apresentaram um erro baixíssimo, de cerca de 2%, sendo resultados com boa exatidão e boa precisão.

Já para as forças de avanço, a simulação apresentou grandes erros em qualquer condição quando comparado aos ensaios experimentais, sendo inexatos e imprecisos.

Para uma análise mais profunda, sugere-se então, o estudo de mais condições de testes, com materiais semelhantes aos utilizados, com parâmetros menores que as condições de corte trabalhadas, e parâmetros intermediários para as geometrias das texturas.

4 CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados pelas simulações computadorizadas do *software* Third Wave Systems AdvantEdge™, foi possível perceber que os dados não se replicaram com exata precisão, fato que pode ser justificado pelas imprecisões aleatórias durante os ensaios em laboratório somadas ao fator aleatório do *software* de simulação. Em contrapartida, o comportamento das forças de corte, quando se comparada ensaios em uma menor velocidade de corte (200 m/min), mostrou-se satisfatório para correlação com dados reais, ou seja, o *software* se mostrou um possível meio de estudar tendências e comportamentos das forças de corte segundo os parâmetros adotados, podendo ser empregado como pré-teste em algumas situações. Resumidamente, os resultados obtidos com o software indicam que:

- O software demonstrou precisão e confiabilidade na avaliação da força de corte em simulações realizadas com velocidades próximas de 200 m/min.
- Não apresentou resultados satisfatórios para a avaliação da força de avanço em nenhuma das condições analisadas.
- Os resultados referentes à comparação entre diferentes tipos de texturas mostraram-se precisos e coerentes.
- Em condições mais agressivas, como profundidade de corte elevada (3 mm) para a geometria de textura estudada, o software indicou falhas na ferramenta, sugerindo quebra da aresta de corte. Essa mesma tendência foi observada nos ensaios experimentais, reforçando a validade das simulações para prever tais fenômenos.

Dessa forma, o software pode ser uma ferramenta útil para a análise de tendências e comportamentos das forças de corte, mas possui limitações em determinadas condições, especialmente para a força de avanço e cortes mais severos.

REFERÊNCIAS

ALCAN. Manual da Soldagem. **Alcan Alumínio do Brasil S/A**, 1 a edição, 1993.

ALUMINUM ASSOCIATION et al. **Aluminum standard and data**, Aluminum Association, 2000. Disponível em: <https://www.aluminum.org/aluminum-standards-and-data> Acesso em 08/09/2024

CLARK, L E.; SEM, P. K. Advances in the development of ultrahard cutting tool material. **Industrial Diamond Review**, n. 2, p. 40-44, 1998.

DHAGE, S; JAYAL, A. D.; SARKAR, P. Effects of surface texture parameters of cutting tools on friction conditions at tool-chip interface during dry machining of AISI 1045 steel. **Procedia Manufacturing**, v. 33, p. 794-801, 2019.

LIMA, M. S. F. Laser beam welding of titanium nitride coated titanium using pulse-shaping. **Materials Research**, v. 8, p. 323-328, 2005.

MISHRA, S. K.; GHOSH, S.; ARAVINDAN, S. 3D finite element investigations on textured tools with different geometrical shapes for dry machining of titanium alloys. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 141, p. 424-449, 2018- A.

SHARMA, V; PANDEY, P. M. Recent advances in turning with textured cutting tools: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 701-715, 2016.

SILVA, FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 5 edições. Editora Edgard Blucher, São Paulo, p. 754, 1970.

SOUZA, F. C. R. **Efeito da texturização em ferramentas de PCD no torneamento de Alumínio 2011-T4**. 2022 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.