

# AValiação da Texturização a Laser em Ferramentas de Corte Aplicadas ao Torneamento de Ti6Al4V: Otimização por Planejamento Composto Central

Felipe Chagas Rodrigues de Souza<sup>1</sup>, felipechagas@ufu.br

Maria Alice de Oliveira<sup>1</sup>, m.alice@ufu.br

Wagner de Rossi<sup>2</sup>, wderossi@ipen.br

Denis Boing<sup>3</sup>, denis.boing@sandvik.com

Marcelo Kuroda<sup>4</sup>, m.kuroda@blaser.com

Álison Rocha Machado<sup>1,5</sup>, alisson.rocha@pucpr.br

<sup>1</sup> Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, 38400-902, Uberlândia, MG, Brazil

<sup>2</sup> Centro de Lasers e Aplicações, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, São Paulo, 05508-000, Brasil

<sup>3</sup> Sandvik Coromant, Stokolm, Sweden

<sup>4</sup> Blaser Swisslube do Brasil Ltda, Santo André, SP, Brasil

<sup>5</sup> Mechanical Engineering Graduate Program, Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC-PR, R. Imaculada Conceição, 1155, Bairro Prado Velho, CEP 80215-901, Curitiba/PR, Brasil

**Resumo.** *O presente estudo dá continuidade à trabalhos anteriores que compõem um projeto de doutorado. Este projeto investiga o uso de ferramentas de corte de metal duro com texturas produzidas por laser de femtossegundos, aplicadas ao torneamento da liga de titânio Ti6Al4V, um material de difícil usinabilidade. O objetivo principal é analisar como diferentes geometrias de texturas influenciam o desempenho da usinagem, avaliando variáveis como força de corte, rugosidade da peça, morfologia do cavaco, vida da ferramenta e efeitos da lubrificação. A pesquisa é estruturada em três etapas experimentais progressivas. Os resultados obtidos ao longo da primeira e segunda etapa do projeto demonstram que a texturização da superfície de saída da ferramenta de corte tem potencial significativo para melhorar a usinagem da liga Ti6Al4V. Com isso, um planejamento composto central (PCC) foi aplicado para aprofundar a análise sobre as demais variáveis. Os dados obtidos mostraram que certas combinações dessas variáveis promoveram reduções significativas nas forças de usinagem e na rugosidade da peça, evidenciando o efeito tribológico positivo das texturas quando devidamente ajustadas às condições de corte. Além disso, identificou-se que o efeito das texturas é dependente da faixa de avanço empregada, sugerindo que o comportamento do cavaco e sua interação com as texturas mudam significativamente conforme a carga aplicada no processo. Com os modelos gerados pela metodologia de superfícies de resposta (RSM), foi possível estimar os valores ótimos das variáveis geométricas da textura, cerca de 0° para a direção dos sulcos e 200 μm para a distância até a aresta de corte, permitindo, na etapa seguinte, buscar o máximo desempenho da ferramenta. Nessa fase, será realizada uma comparação direta com uma ferramenta não texturizada, a fim de quantificar os ganhos obtidos com a estratégia adotada, incluindo também a avaliação da vida útil da ferramenta em diferentes condições de usinagem.*

**Palavras chave:** *Texturização de ferramentas, Laser femtossegundos, Processo de torneamento, Ti6Al4V, Planejamento Composto Central*

## 1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos processos mais utilizados na fabricação mecânica, caracterizando-se pela remoção de material na forma de cavaco por meio da ação relativa entre ferramenta e peça (Normung, 2003). Dentro deste contexto, o torneamento se destaca por sua simplicidade operacional e ampla aplicabilidade industrial, representando aproximadamente 70% das publicações recentes sobre usinagem (Klock e König, 2007; Machado *et al.*, 2015). A eficiência do corte depende de fatores como a dureza da ferramenta, sua resistência ao desgaste e sua afinidade química com o material usinado. Estratégias que promovam a redução de forças de usinagem, o aumento da vida da ferramenta ou a melhoria da qualidade da superfície têm ganhado destaque, como o uso de novos materiais, revestimentos e, mais recentemente, a texturização da superfície de saída da ferramenta (Kawasegi *et al.*, 2009; Machado *et al.*, 2021).

A texturização com laser de femtossegundos cria padrões topográficos microscópicos que alteram o comportamento tribológico da interface cavaco-ferramenta, possibilitando a redução da área de contato, a retenção de resíduos ou lubrificantes sólidos, e a modificação do escoamento do cavaco (Lima, 2005). Esses efeitos contribuem para reduzir forças de corte, minimizar desgaste e melhorar a rugosidade superficial da peça usinada (Feng *et al.*, 2017).

Neste contexto, desenvolve-se um projeto de doutorado com o objetivo de investigar a aplicação de ferramentas de corte de metal duro texturizadas por laser de femtossegundos no torneamento da liga Ti6Al4V, com fluido de corte aplicado em abundância. O projeto foi estruturado em três etapas experimentais:

- Na primeira, compararam-se diferentes geometrias de textura com uma ferramenta lisa, com base em um planejamento fatorial completo;
- Na segunda, realizou-se a otimização das variáveis mais influentes — distância da textura à aresta de corte e direção dos sulcos — com as dimensões fixadas, utilizando um Planejamento Composto Central (PCC);
- Por fim, a terceira etapa, ainda em andamento, consistirá na avaliação da textura otimizada sob diferentes velocidades de corte, com e sem aplicação de lubrificante sólido (MoS<sub>2</sub>), incluindo testes de vida da ferramenta.

Em edições anteriores foram apresentados o plano de trabalho do projeto (2023) e os resultados da primeira etapa experimental (2024). O presente trabalho traz os resultados da segunda etapa, cuja importância reside na refinada modelagem estatística das variáveis de entrada e na identificação de configurações geométricas mais eficientes. Com base na análise estatística da etapa anterior, constatou-se que a variável dimensões da textura apresentou baixa influência dentro da faixa estudada, embora com tendência favorável para valores menores. Dessa forma, optou-se por fixar as dimensões nos menores valores testados (20 µm de profundidade, 40 µm de largura e 40 µm de espaçamento), concentrando a análise nas variáveis com maior impacto.

A aplicação do PCC permitiu avaliar, com base em técnicas de superfície de resposta, o efeito combinado da distância da textura em relação à aresta de corte e da direção dos sulcos sobre duas variáveis de saída: força de corte resultante e rugosidade superficial da peça. A segunda etapa permitiu não apenas a identificação de configurações geométricas mais eficientes, mas também forneceu resultados quantitativos claros quanto à redução das forças de usinagem e da rugosidade em função das variáveis otimizadas, consolidando o papel da texturização como técnica eficaz de melhoria no desempenho do processo. Também foi observado que o efeito da textura depende da faixa de avanço, o que sugere que a interação entre cavaco e textura varia conforme a carga de corte e o tipo de escoamento do material na zona de cisalhamento.

## 2. METODOLOGIA

A etapa 2 deste projeto teve como objetivo a otimização das variáveis geométricas mais influentes na performance da ferramenta de corte texturizada durante o torneamento da liga Ti6Al4V. Para isso, foram utilizados os resultados estatísticos obtidos da etapa 1 do projeto, o qual empregou um planejamento fatorial completo com três variáveis geométricas (dimensões dos sulcos, distância da textura à aresta de corte e direção dos sulcos) e dois níveis de avanço. Cada condição experimental foi repetida para garantir robustez estatística, e os dados foram processados com software estatístico (Statistica®), ajustando modelos quadráticos para cada variável de resposta e realizando testes de significância (ANOVA). A partir dos modelos obtidos, foram geradas superfícies de resposta e mapas de contorno, que permitiram a identificação de algumas regiões de operação otimizadas quanto à força de usinagem e rugosidade superficial da peça torneada.

A análise de variância (ANOVA) aplicada aos resultados (gerados na etapa 1 deste projeto) de força de corte e rugosidade permitiu concluir que a variável "dimensões da textura" teve influência reduzida dentro da faixa avaliada, enquanto as variáveis "direção dos sulcos" e "distância da textura à aresta de corte" apresentaram maior impacto sobre o desempenho do processo. O avanço mostrou-se a variável mais influente, como esperado numa torneamento de titânio (e o intervalo do avanço foi relativamente alto, variando entre 0,1 e 0,3 mm/rev). Logo, as variáveis mais influentes na usinagem com ferramentas texturizadas as seguintes: distância da textura em relação à aresta de corte, direção dos sulcos, avanço de corte (f) e, com menor influência, as dimensões da textura (para o intervalo estudado).

Dessa forma, na segunda etapa, a variável "dimensões" foi mantida fixa nos menores valores utilizados anteriormente (profundidade de 20 µm, largura de 40 µm e espaçamento de 40 µm), pois o nível (-1) dessa variável, apesar de não ter sido considerada influente, mostrou uma tendência em gerar melhores resultados quando trabalhadas com valores menores (para a faixa estudada). Assim, foi estruturado um Planejamento Composto Central (PCC) com foco nas duas variáveis mais significativas sobre as características geométricas de um textura do tipo sulco: distância da textura à aresta de corte (em µm) e direção dos sulcos (em graus).

O Planejamento Composto Central (PCC) é um modelo experimental estatístico amplamente utilizado em otimizações de processos industriais e laboratoriais. Ele combina um planejamento fatorial 2<sup>2</sup> (com dois níveis para cada variável), pontos axiais (ou estrela) que expandem os limites investigados, e ensaios no ponto central (repetidos) para avaliar a reprodutibilidade dos dados e a curvatura da resposta. O resultado é uma malha experimental com cinco níveis para cada variável:  $-\alpha$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $+1$  e  $+\alpha$ , permitindo o ajuste de modelos quadráticos por técnicas conhecidas como superfície de resposta (RSM).

A Equação 1 mostra o cálculo de  $\alpha$ , a Equação 2 mostra o  $X_0$  (ponto central) e a Equação 3 o cálculo do  $X_{\pm\alpha}$  ( $X$  representando uma das variáveis). Na presente etapa, o número de variáveis trabalhadas foram 3 ( $k = 3$ ) e, portanto, o valor de  $\alpha$  é de aproximadamente 1,682.

$$\alpha = (2^k)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

$$X_0 = \left(\frac{X_{+1} + X_{-1}}{2}\right) \quad (2)$$

$$X_{\pm\alpha} = X_0 \pm \alpha \left(\frac{X_{+1} - X_{-1}}{2}\right) \quad (3)$$

O planejamento composto central (PCC) adotado nesta etapa foi construído de forma a garantir simultaneamente rotabilidade e ortogonalidade, características desejáveis em modelos estatísticos baseados em superfícies de resposta. A rotabilidade foi assegurada pelo uso do valor de  $\alpha$  válida para o  $k$  trabalhado. Esse valor garante que a variância das previsões do modelo seja constante em todos os pontos equidistantes do centro, mantendo a simetria geométrica da malha experimental. Já a ortogonalidade foi garantida pela construção cuidadosa da matriz de planejamento, com pontos fatoriais e axiais distribuídos simetricamente e ponto central incluído. A ortogonalidade foi verificada por meio da análise da matriz de correlação das variáveis codificadas, que apresentou valores nulos para todas as combinações cruzadas, indicando independência total entre os fatores. Isso significa que os efeitos principais, quadráticos e de interação estimados pelo modelo são estatisticamente independentes entre si, evitando sobreposição de informações e permitindo uma interpretação precisa dos resultados. Essa estrutura experimental, ao combinar rotabilidade e ortogonalidade, proporciona maior qualidade na previsão dos efeitos das variáveis, melhora o ajuste dos modelos estatísticos e favorece a extração de conclusões sólidas sobre o comportamento do processo em estudo.

Todas as ferramentas foram texturizadas com laser de femtossegundos no IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), com controle de parâmetros de usinagem laser de alta precisão. As ferramentas são pastilhas de metal duro SPUN120304, classe ISO H13A, fixadas em suporte Sandvik CSDPR 2525 M12. Os testes de usinagem foram realizados em torno CNC ROMI Multiplic 35D, com velocidade de corte de 70 m/min e profundidade de corte de 1 mm, utilizando fluido de corte Vasco 7000 (7%) em abundância, com vazão de 10 L/min e pressão de 1,2 bar.

As variáveis de resposta foram:

- Força de usinagem resultante ( $F_u$ ): obtida pela soma vetorial das componentes  $F_c$ ,  $F_f$  e  $F_p$ , medida com dinamômetro piezométrico Kistler 9265-B;
- Rugosidade média ( $R_a$ ): medida com rugosímetro Taylor Hobson Surtronic S-128, com três medições por amostra.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Planejamento Composto Central (PCC), cada variável foi ajustada para cinco níveis: os níveis inferiores e superiores testados na etapa 1 ( $-1$  e  $+1$ ), um nível central (0), e dois níveis axiais ( $-\alpha$  e  $+\alpha$ ), definidos por extrapolação em relação ao centro. Essa estrutura permite o ajuste de modelos quadráticos e a construção de superfícies de resposta mais precisas. A seguir, a Tabela 1 apresenta os níveis de codificação e os valores calculados para cada variável investigada na etapa 2.

Tabela 1. Níveis de codificação adotados para as variáveis do PCC na etapa 2

VARIÁVEL	$-\alpha$	$-1$	0 (CENTRAL)	$+1$	$+\alpha$
Distância da textura à aresta de corte ( $\mu\text{m}$ )	25	75	150	225	275
Direção dos sulcos ( $^\circ$ )	$-7$	0	45	90	97
Avanço de corte (mm/rev)	0,05	0,10	0,20	0,30	0,35

No caso da variável "distância da textura até a aresta de corte", que na etapa anterior foi testada em dois níveis (75  $\mu\text{m}$  e 225  $\mu\text{m}$ ), definiu-se um valor central de 150  $\mu\text{m}$ . Para garantir a cobertura estatística apropriada do intervalo e permitir a construção de superfícies de resposta confiáveis, foram definidos os níveis axiais com base em um  $\alpha$  (alfa) calculado para manter a rotacionalidade do modelo, expandindo os limites inferior e superior para 25  $\mu\text{m}$  e 275  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Já a "direção dos sulcos", inicialmente avaliada em  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , seguiu o mesmo princípio, sendo definidos os níveis intermediários e extremos de variação em torno de um ponto central de  $45^\circ$ . Dessa forma, a malha experimental permitiu explorar com maior refinamento a região onde os melhores resultados haviam sido observados na etapa anterior.

A análise dos resultados obtidos na segunda etapa permitiu avaliar, de forma mais refinada, os efeitos das variáveis distância da textura à aresta de corte, direção dos sulcos e avanço de corte sobre o desempenho da ferramenta texturizada no torneamento da liga Ti6Al4V. As respostas consideradas foram a força de usinagem resultante ( $F_u$ ) e a rugosidade média da superfície usinada ( $R_a$ ), medidas sob condições fixas de velocidade de corte, profundidade de corte e fluido aplicado em abundância. Com base no planejamento composto central (PCC), foi possível ajustar modelos quadráticos de superfície de resposta para ambas as variáveis de saída. A significância estatística dos termos dos modelos foi avaliada por análise de variância (ANOVA).

A Figura 1 ilustra a aresta de corte de uma ferramenta texturizada. As texturas ocupam uma área quadrada de 9 mm<sup>2</sup>. A imagem destaca algumas referências utilizadas para definir os parâmetros geométricos da textura do tipo sulco. A linha

"A" indica a aresta principal de corte, enquanto a linha "B" representa a direção dos sulcos da textura. Neste exemplo, as linhas "A" e "B" são paralelas, portanto, o parâmetro "Direção" da textura é igual a  $0^\circ$ , significando que os canais estão perpendiculares ao fluxo do cavaco. A linha "C" representa a distância entre as linhas "A" e "B", ou seja, a "Distância da Aresta de Corte", que define o início da primeira textura. Este parâmetro é de extrema importância: se a distância for muito grande, o cavaco pode ter pouco ou nenhum contato com a superfície texturizada, resultando em efeito negligenciável no corte. Por outro lado, se a "Distância da Aresta de Corte" for muito pequena, a textura pode enfraquecer mecanicamente a aresta de corte, favorecendo o surgimento de trincas nas texturas, que podem funcionar como acumuladores de tensão. Os demais parâmetros dimensionais da textura são as distâncias "D" e "E", que correspondem, respectivamente, à "Largura" e ao "Espaçamento" dos sulcos. Ambos têm o mesmo valor, numericamente igual ao dobro da profundidade da textura. O tamanho da Largura e da Profundidade influencia diretamente o efeito da textura, como a área de contato cavaco-ferramenta, o grau de adesão, a retenção de fluido de corte e a acumulação de detritos. Já o valor do Espaçamento define a intensidade com que a textura influenciará o processo de usinagem.

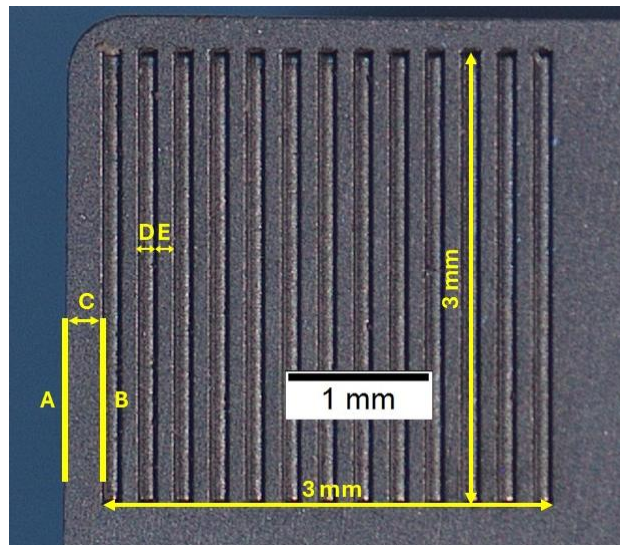


Figura 1. Imagem da face de saída de uma ferramenta texturizada (direção paralela à aresta de corte). A imagem identifica alguns dos parâmetros geométricos da textura do tipo sulco que foram variáveis no estudo

As superfícies de resposta geradas a partir do planejamento composto central (PCC) ilustram o comportamento da força de usinagem e da rugosidade superficial em função da direção do sulco, distância do sulco até a aresta de corte e avanço. A Figura 2.A apresenta a superfície de resposta relativa às forças de usinagens, considerando as variáveis direcionais e geométricas do sulco para o avanço fixo no ponto central. Observa-se que há 2 possíveis regiões para uma geometria de textura ótima. Já a Figura 2.B exibe a superfície de resposta referente à rugosidade superficial ( $R_a$ ), destacando as regiões onde se obtêm os menores valores do parâmetro em estudo. Nota-se que há somente uma região para uma geometria de textura ótima, e que é próxima de uma das regiões para a resposta das forças de usinagem.

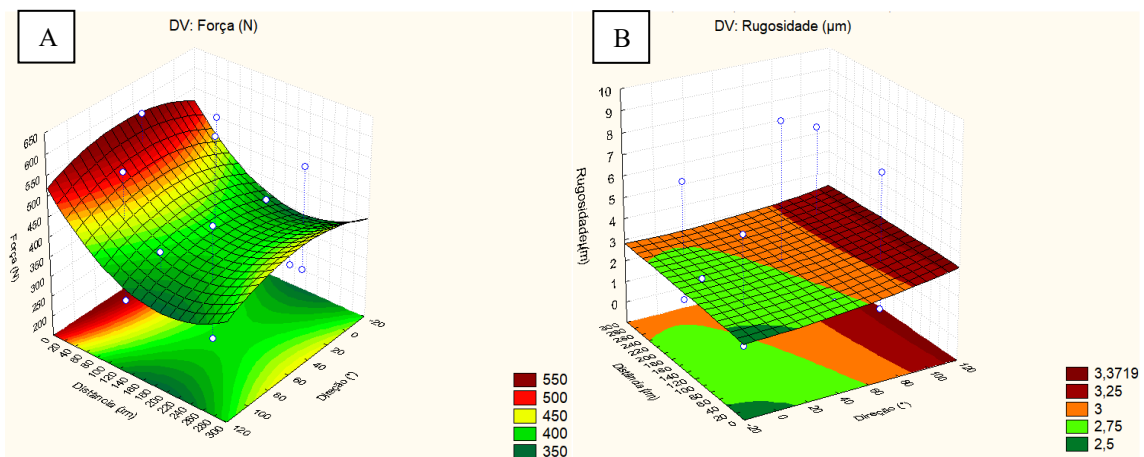


Figura 2. Superfície de Resposta da Força de Usinagem (N) em "A", e Rugosidade- $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) em B, ambos em função da Distância ( $\mu\text{m}$ ) e da Direção ( $^\circ$ ).

A análise conjunta das superfícies indica que o ponto ótimo, resultante do equilíbrio entre a minimização da força de usinagem e da rugosidade, situa-se próximo a  $-7^\circ$  na direção dos sulcos e 212  $\mu\text{m}$  para a distância do início das texturas em relação à aresta de corte. Essa condição será utilizada para a produção da textura ótima, aproximando os respectivos valores para  $0^\circ$  e 200  $\mu\text{m}$ . Já o avanço será testado em condições de acabamento e desbaste.

Na etapa seguinte deste trabalho, denominada Etapa 3, será realizada a validação experimental da ferramenta texturizada produzida com os parâmetros ótimos identificados. O objetivo dessa etapa será comparar o desempenho da ferramenta otimizada com o da ferramenta convencional não texturizada, buscando confirmar a redução das forças de usinagem e a melhoria da qualidade superficial, por meio da rugosidade, em condições reais de corte.

A análise conjunta dos dados revelou que realmente o efeito das texturas podem alterar radicalmente com o torneamento é realizado numa faixa de velocidade significativamente diferente. Em geral, os efeitos principais mostraram maior influência do que os efeitos de segunda ordem, porém o modelo quadrático permitiu identificar regiões de ótimo local para operação do processo com base nas respostas desejadas.

Além disso, foi observada uma compatibilidade com os resultados da etapa 1, reforçando a consistência dos efeitos tribológicos das texturas sobre o processo de corte. A presença de texturas aplicadas com precisão, respeitando distância e orientação adequadas, mostrou-se novamente uma estratégia eficaz para redução de forças de usinagem e melhora do acabamento superficial, mesmo sob condições constantes de velocidade e fluido.

#### 4. CONCLUSÕES

A segunda etapa do presente projeto permitiu o aprofundamento na análise dos efeitos das variáveis geométricas de texturização sobre o desempenho de ferramentas de corte no torneamento da liga Ti6Al4V. Através da aplicação do Planejamento Composto Central (PCC), foram avaliadas de forma sistemática as influências da distância da textura até a aresta de corte, da direção dos sulcos e do avanço de corte sobre as respostas de força de usinagem e rugosidade da peça usinada.

Os resultados experimentais demonstraram que há combinações específicas dessas variáveis capazes de reduzir significativamente os esforços de corte e melhorar a qualidade superficial, o que reforça o potencial da texturização como estratégia de otimização do processo de usinagem de materiais de difícil usinabilidade.

Com base nos modelos obtidos por superfície de resposta (RSM) foi possível aproxima os valores ótimos de cada variável geométrica da textura (aproximadamente  $0^\circ$  na direção dos sulcos e 200  $\mu\text{m}$  para a distância do início das texturas em relação à aresta de corte), possibilitando na próxima etapa maximizar o desempenho da ferramenta. A seguir, será realizada uma comparação direta entre a ferramenta com textura otimizada e uma ferramenta sem texturização, de modo a quantificar os ganhos efetivos obtidos com o uso da estratégia proposta. Essa etapa incluirá ainda a análise da vida útil da ferramenta em diferentes condições de corte.

Dessa forma, os resultados desta fase consolidam a base experimental e estatística necessária para a finalização do projeto, e evidenciam o papel relevante do ajuste geométrico das texturas como elemento de melhoria técnica e econômica no processo de torneamento de ligas de titânio.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Feng, Y., *et al.*, 2017. "Fabrication techniques and cutting performance of micro-textured self-lubricating ceramic cutting tools by in-situ forming of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ ." *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 68: 121-129.
- Kawasegi, N., *et al.*, 2009. "Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior." *Precision Engineering* 33.3: 248-254.
- Klock, F. And König, W., 2007. "Fertigungs verfahren 3: Abtragen, Generieren Laser material bearbeitung", VDI-Buch, Springer-Verlag, Berlin, 389p.
- Lima, M.S.F., 2005. "Laser beam welding of titanium nitride coated titanium using pulse-shaping." *Materials Research* 8, 323-328.
- Machado, Á. R., Coelho, R. T., Abrão, A. M., e da Silva, M. B., 2015. *Teoria da usinagem dos materiais*. Editora Blucher.
- Machado, A.R., *et al.*, 2021, "State of the art of tool texturing in machining", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 293, 2021, 117096, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117096>.
- Normung, D. I. für., 2003. "DIN 8589–Fertigungsverfahren Spanen. In Teil 11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug: Einordnung, Unterteilung, Begriffe". Beuth Verlag Berlin.

#### 6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos: FAPEMIG, Sandvik, Blaser, IPEN-USP e FEMEC-UFU e todos professores e técnicos envolvidos.

#### 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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