

## EFEITO DA TEXTURIZAÇÃO EM FERRAMENTAS DE PCD NO TORNEAMENTO DE ALUMÍNIO 2011-T4

Felipe Chagas Rodrigues de Souza, UFU, felipechagas@ufu.br  
Álison Rocha Machado, PUC-PR e UFU, alisson.rocha@pucpr.br  
Wagner de Rossi, IPEN, wderossi@gmail.com  
Eder Silva Costa, UFU, edercosta@ufu.br  
Leonardo Carvalho Aires, UFU, leonardo.aires@ufu.br

---

**Resumo.** A usinagem, por ser um dos processos de fabricação mais utilizado na indústria manufatureira, tem seu aprimoramento como um grande propósito entre pesquisadores. Dentre essas possíveis técnicas de aprimoramento, a texturização da ferramenta de corte é um destaque. Neste aspecto, é notório que algumas combinações de materiais são mais favoráveis à usinagem para a durabilidade das texturas durante o corte, como é o caso da usinagem do alumínio, um material dúctil e amplamente utilizado nas indústrias, aliada a uma ferramenta de alta resistência como o PCD. Esta combinação é altamente viável, pois não há desgaste significativo na ferramenta, ao contrário da maioria dos casos, em que há um desgaste rápido na ferramenta que consome a textura em pequenos percursos de usinagem, diminuindo ou anulando o efeito da textura. Logo, a fim de verificar os efeitos da texturização, este trabalho realizou testes de torneamento da liga de Alumínio 2011-T4, com ferramentas de PCD com diferentes tipos de texturas e considerando a temperatura de usinagem medida por uma termocâmara infravermelha. Testes com ferramentas sem texturas (lisas) também foram conduzidos para comparação. As texturas foram usinadas por laser femtossegundos de Ti:safira, variando-se a direção, profundidade e largura dos canais. As texturas beneficiaram a segmentação do cavaco e conseqüentemente a dissipação do calor gerado e também o acabamento da peça. As texturas perpendiculares à aresta de corte com lubrificante foram as que apresentaram os melhores resultados em relação às ferramentas sem textura: para dimensões menores reduziu a temperatura em 9 %.

**Palavras-chave:** Texturização, PCD, Alumínio, Usinagem.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Inicialmente, a texturização foi pouco estudada por consistir em um processo de produção complicado, com técnicas de difícil repetibilidade. Entretanto, na última década, a popularização de técnicas de texturização, como por exemplo, o uso de laser, possibilitou a pesquisa de textura como um objeto de estudo ainda mais atraente. O artigo de Samad *et al.* (2012) indica que o laser de pulso ultracurto é uma grande tendência para a realização de texturizações em ferramentas, haja vista sua alta repetibilidade sem danificar a superfície texturizada.

Nos últimos anos, alguns pesquisadores buscaram compilar os estudos dos efeitos da texturização em *reviews*, como por exemplo, nos trabalhos de Sharma, Panday e Pulak (2016), Arslan *et al.* (2016) e Gajrani e Sankar (2017), sendo o mais recente e completo, o trabalho de Machado *et al.* (2021). Através destes trabalhos, há uma clara convergência entre as conclusões, todavia, existem ainda, parâmetros cujos resultados divergem drasticamente entre os autores. Para exemplificar: enquanto Dhage, Jayal e Sarkar. (2019) concluíram que *grooves* lineares são mais eficientes tribologicamente para a direção paralela à aresta de corte, Mishra, Ghosh e Aravindan (2019) encontraram resultados em que tal direção eleva o atrito no corte, piorando a usinagem. Uma das possíveis causas de resultados tão diferentes consiste na grande diferença entre as propriedades dos materiais estudados em cada trabalho, em que no primeiro os autores estudaram aço carbono enquanto que no segundo o material foi o Ti6Al4V, tendo grande diferença entre suas propriedades mecânicas (destacando a dureza, resistência e a densidade). Os trabalhos como de Sharma e Panday *et al.* (2016) compilaram conclusões sem considerar os materiais usinados, prevalecendo apenas os resultados concordantes encontrados em maior número. Logo, os efeitos da usinagem para materiais menos estudados acabam sendo mascarados, como é o caso do alumínio, um material amplamente utilizado nas indústrias, mas que, segundo os estudos de Machado *et al.* (2021), correspondem à apenas 16 % dos materiais estudados nos últimos 5 anos quanto ao efeito de texturização de ferramentas.

É importante estudar alguns parâmetros de texturas (direção, profundidade, largura, distanciamento e geometria), porém, estes parâmetros possuem forte dependência com a combinação de material e ferramenta usinados, e se tratando de Alumínio e PCD (diamante policristalino), não há estudos conclusivos sobre o assunto. Devido à alta ductilidade do alumínio, seu cavaco se deforma facilmente, preenchendo toda a textura e não havendo redução na área de contato entre o cavaco e a ferramenta (Sasi, Subbu e Palani, 2017). Por conseguinte, fica inviável a opção de se trabalhar com texturas rasas na usinagem do alumínio. É preciso encontrar o melhor tipo de textura e expor sua eficiência em relação a uma ferramenta sem textura. Neste trabalho ferramentas e PCD texturizadas foram utilizadas no tornemaneto de alumínio 2011-T4 com foco na temperatura de usinagem. Ferramentas sem texturas também foram testadas para comparação. Foram variados os parâmetros de dimensões e geometrias das texturas, mas, ao invés de análises focadas apenas nos efeitos das texturas, será verificado se tais parâmetros estão também atrelados às propriedades dos materiais aqui estudados. A escolha da correlação de usinagem de Alumínio com ferramenta de PCD baseou-se em conclusões como,

por exemplo, do trabalho de Alagan *et al.* (2019). Nesse artigo, usinou-se um material duro (Inconel 718) e nesses casos, o desgaste da ferramenta faz a profundidade da textura se reduzir, até que a textura se acabe por completo. Isso inviabiliza o uso de ferramentas texturizadas em operações que exigem maior percurso da ferramenta. A redução em porcentagem do desgaste pode ser alta, mas não há muita aplicação se isso ocorre apenas num percurso pequeno. Assim, ao utilizar um material muito duro como PCD na ferramenta, para tornear um metal de alta usinabilidade como o Alumínio, o desgaste torna-se irrelevante e a textura permanece atuante na ferramenta por longos percursos de corte.

## 2. METODOLOGIA

Para a usinagem foi escolhido o processo de torneamento de barras extrudadas de alumínio 2011-T4, com dureza média de 99 HV 0,05, e em sua composição química, possui mais de 5% de cobre, aproximadamente 1% de chumbo e bismuto (juntos) e menos de 1% de Fe. Estas barras foram tratadas termicamente e envelhecidas naturalmente.

Utilizou-se ferramentas de diamante policristalino – PCD, com modelo dos insertos identificado como K83037, fabricado Pela Mapal do Brasil, Ferramentas de Precisão Ltda e foram produzidos unicamente para este projeto. Porém as dimensões são compatíveis com o código ISO: CPMB 120404.

A Tabela 1 detalha os parâmetros das condições estudadas. Para evitar interferência da ordem dos resultados, os ensaios foram realizados de forma aleatória. Logo, para verificar o comportamento da variável de resposta (temperatura) foram realizados testes em 8 condições distintas, com 2 réplicas cada, totalizando 24 ensaios. É importante ressaltar que, além da combinação de ensaios citados nesta Tabela 1, também serão realizados ensaios com ferramentas lisas (sem texturas) nas mesmas condições de usinagem.

Tabela 1 – Matriz de Planejamento para os ensaios com fatorial fracionado  $2^{4-1}$ .

Condição do ensaio	Direção da textura	Profundidade/Largura da textura ( $\mu\text{m}$ )	Velocidade de corte (m/min)	Condição de Lubrificação
1	Paralela	45	400	Seco
2	Perpendicular	45	400	Com MoS <sub>2</sub>
3	Paralela	120	400	Com MoS <sub>2</sub>
4	Perpendicular	120	400	Seco
5	Paralela	45	200	Com MoS <sub>2</sub>
6	Perpendicular	45	200	Seco
7	Paralela	120	200	Seco
8	Perpendicular	120	200	Com MoS <sub>2</sub>

Sobre os parâmetros citados na Tabela 1 é importante lembrar que a direção das texturas está referenciada em relação à aresta de corte da ferramenta. A profundidade e largura das texturas são iguais em valores.

A profundidade de corte ( $a_p$ ), foi restringida pelas dimensões da placa de PCD da ferramenta de corte. A aresta de corte permitia uma profundidade máxima de 3,6 mm e, para evitar que o cavaco escoasse fora da área texturizada, definiu-se uma profundidade de corte fixa em 2 mm. Para manter a correlação de proporcionalidade (índice de esbeltez =  $a_p/f$ ) de 10, o avanço ( $f$ ) ficou fixado em 0,2 mm.

O lubrificante sólido escolhido para este trabalho foi pó de bissulfeto de molibdênio (MoS<sub>2</sub>). As partículas desse pó possuem diâmetros de até 5  $\mu\text{m}$  e espessura de aproximadamente 1 nm. Logo, podem facilmente preencher as texturas com as dimensões escolhidas. A aplicação do MoS<sub>2</sub> foi realizada primeiramente com um pincel nas texturas, e na sequência uma mistura de selante com mais lubrificante. A proporção dessa mistura deve ser a máxima diluição do pó que o selante permitir para sua saturação, otimizando o efeito desejado. O selante aplicado foi silicone OrbiVed337, com resistência a temperaturas de até 320°C.

Para a texturização por usinagem a laser das ferramentas, foram utilizados um Laser femtossegundos Ti:safira, modelo Element PRO 400, da Femtolasers Produktions GmbH e um amplificador Femtopower Double 10 kHz, da Femtolasers Produktions GmbH (IPEN).

### 2.1 Análise dos Cavacos

Também foram realizados ensaios de dureza nos cavacos e peça através do Microdurômetro HMV-2 Shimadzu, com carga aplicada de 490 mN (HV 0,05) por um tempo de 15 segundos. O indentador consiste numa pirâmide de base quadrada e ângulo entre faces de 136°. As imagens dos cavacos foram realizadas pelo Microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO MA10 (que também foi utilizado para produzir as imagens das arestas de corte texturizadas).

### 2.2 Análise de Temperatura

Ao se trabalhar com PCD, é importante estar atento à temperatura de trabalho, pois, esse material pode sofrer o processo de grafitação e comprometer sua estrutura, tornando-se um material frágil. Portanto, busca-se estudar se a

temperatura de trabalho do torneamento com as arestas texturizadas vai se estabilizar em uma região de temperatura ideal para o PCD. Apesar do processo de grafitização ter início por volta de 780°C/800°C, estudos como de Jaworska *et al.* (2014) mostraram que por volta de 480°C, a matéria do PCD pode reagir ao calor recebido.

Os ensaios de torneamento foram feitos em um Torno CNC Multiplic 35D (LEPU-UFU) e a medição da temperatura de corte foi realizada com uma termocâmara Flir A325, com taxa de aquisição de 30 Hz e resolução de 320x240 pixels. A câmera foi posicionada sem contato com o torno, para evitar interferência de vibrações, numa posição fixa, 755 mm acima da ferramenta. Para melhor resolução, a porta de proteção do torno permaneceu aberta durante os ensaios, e a lente da câmera ficou protegida de cavacos por um vidro de germânio. A montagem pode ser vista na Figura 1. O tempo de aquisição foi definido após um pré-teste, que mostrou que a temperatura de corte já havia se estabilizada após 5 segundos de usinagem. Ressalta-se que a temperatura aqui obtida corresponde a uma aproximação da superfície da ferramenta, e não à temperatura da interface cavaco-ferramenta.

Também é importante pintar a superfície da ferramenta (após as texturas já preparadas) para dar à ferramenta a emissividade adequada para a aquisição de dados da câmera, que no caso corresponde a 0,95 (Flir, 2015). Pelo ângulo de posicionamento da câmera, os cavacos vão cobrir a região da placa de PCD na ferramenta, não sendo então necessária sua pintura. Porém, a tinta em spray pode cobrir a região das texturas sem problemas, pois, apesar da tinta possuir resistência até 600 °C, o atrito do cavaco vai remover a tinta logo no primeiro contato e não vai interferir em nenhum parâmetro estudado. Desde que a tinta permaneça no restante do corpo da ferramenta, a aquisição dos dados de temperatura permanecem congruentes.

O método da análise da temperatura consistiu em (após a seleção da região dos últimos 5 segundos de usinagem com a temperatura estabilizada) realizar uma média da maior temperatura de cada frame, sempre no mesmo enquadramento para todos os testes.



Figura 1 – Termocâmara filmando de cima uma das barras de alumínio que está sendo usinada no torno Romi.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os quatro tipos de texturas foram produzidos com sucesso na superfície de saída de PCD. A Figura 2 ilustra esses quatro tipos de texturas. A aresta de corte utilizada como referência para o torneamento é a aresta do lado direito das imagens.

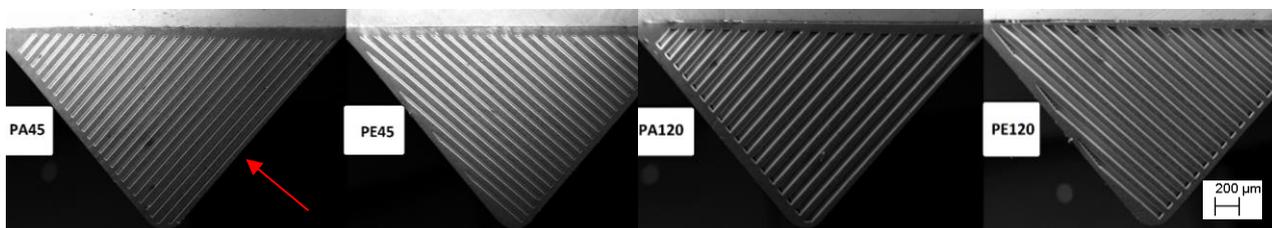


Figura 2 – Tipos de texturas produzidas nas placas de PCD das ferramentas de corte. A aresta principal de corte corresponde à aresta ao lado direito de cada placa de PCD na figura. A seta aponta para uma das arestas de corte, e também indica a direção do fluxo dos cavacos. PA e PE identificam as texturas paralelas e perpendiculares à aresta de corte, respectivamente, 45 e 120 identificam as dimensões da textura, conforme Tabela 1.

Um dos resultados mais notórios na utilização das ferramentas texturizadas foi a alteração na forma dos cavacos gerados. As ferramentas lisas (sem texturas) geraram cavacos helicoidais tubulares curtos (Figuras 3A e 3E). As ferramentas texturizadas geraram cavacos na forma de arcos soltos (Figuras 3B, 3C e 3D), os quais favoreceram a dissipação de calor e aprimoraram a usinagem.

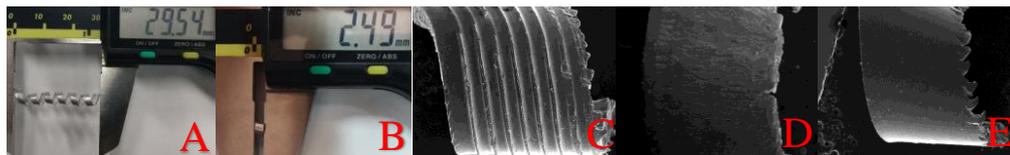


Figura 3 – Exemplos típicos dos cavacos gerados: A e B são os tamanho típicos de cavacos de ferramenta sem textura e com textura, respectivamente. Já nas outras imagens tem-se a superfície dos cavacos gerados por ferramentas de texturas paralelas à aresta de corte (C), de texturas perpendiculares à aresta de corte (D) e sem texturas (E).

Os cavacos do alumínio são contínuos ou parcialmente contínuos, típicos de materiais dúcteis, sofrendo influências das condições de corte e da alta taxa de deformação que o cavaco sofre pelas texturas. Tal fenômeno promove o encruamento e deixa o cavaco mais duro e quebradiço. Com o intuito de investigar tal comportamento, ensaios de dureza foram realizados nos cavacos. Nos cavacos helicoidais tubulares, gerados pelas ferramentas lisas, a microdureza média encontrada foi de 102 HV 0,05, bem próximas à dureza da peça (99 HV 0,05). Por outro lado, os cavacos e arcos soltos gerados pelas ferramentas texturizadas tiveram durezas significativamente maiores, sendo, em média, 119 HV para os cavacos das texturas tipo PA45, 122 HV 0,05 para o tipo PE45, e 131 HV 0,05 para o tipo PE120 (cavaco com maiores deformações), confirmando o significativo encruamento. Devido ao trincamento de todas as arestas de corte do tipo PA120, os cavacos gerados nesse tipo não apresentaram nenhum padrão e por tanto não puderam ser analisados.

Na Figura 4 tem-se a comparação entre um torneamento com textura tipo PE45 à esquerda e ferramenta lisa à direita, ambos para  $v_c = 400$  m/min. O cavaco helicoidal tubular permanece em contato por mais tempo com a interface do corte, transmitindo calor para a barra. Na ferramenta texturizada, os cavacos na forma de arcos-soltos ejetam-se com maior frequência da interface de corte, ajudando a dissipar o calor gerado. Observa-se maior intensidade do campo térmico na barra torneada com ferramentas sem textura. É importante ressaltar que na Figura 4, com a finalidade de desprezar o calor presente nos cavacos espalhados sob a peça, enquadrrou-se apenas as regiões de interesse para a realização da análise de temperatura. Também importante ressaltar que não houve formação de rebarba nos ensaios aqui considerados (apenas nos casos com quebra de aresta de corte).

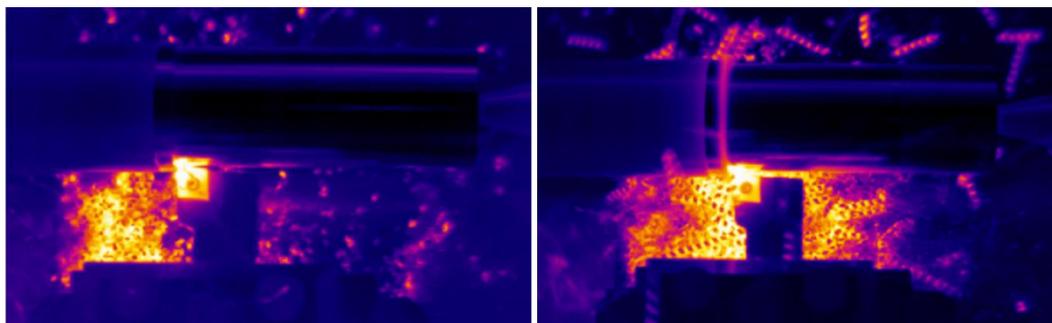


Figura 4 – Comparação térmica entre a presença (esquerda) e ausência (direita) de textura na ferramenta de corte durante o torneamento com  $v_c = 400$  m/min. A ferramenta sem textura está em média 16 °C acima da texturizada, mas a maior diferença entre estes testes está no calor passado para a barra quando a ferramenta é sem textura. Tal efeito está relacionado ao maior tempo do cisalhamento do cavaco nesta condição.

Os gráficos da Figura 5 mostram a média das máximas temperaturas da superfície da ferramenta em cada frame obtido com a termocâmera durante a usinagem. É importante ressaltar que não foram inseridas barras de erro nos gráficos pois nas arestas que houve trincas o erro foi exagerado, enquanto que nas demais não ultrapassou 5%.

A presença de texturas favoreceu a redução de temperatura em todos os casos que não houve quebra da textura próximo à aresta de corte (textura tipo PA120) em ambas as velocidades, e textura tipo PA45 para  $v_c = 400$  m/min). A maior redução foi para a textura tipo PE45 com lubrificante ( $v_c = 400$  m/min), que reduziu a temperatura em mais de 9% em comparação com a ferramenta sem textura. Tal valor corrobora com o trabalho de Sun *et al.* (2016), que também realizaram torneamento com ferramentas texturizadas preenchidas com  $\text{MoS}_2$ , e encontraram valores de redução de temperatura numa faixa de 7 a 21%. Ainda há trabalhos como o de Jesudass e Kalaichelvan (2018) que tornearam alumínio e encontraram reduções de temperaturas de poucos mais de 3% para ferramentas texturizadas. Um valor menor, mas condizendo com o tipo de textura testada: *dimples* (neste tipo a redução de área de contato é menor do que em texturas *grooves*).

A direção que favoreceu a usinagem foi com texturas perpendiculares à aresta de corte (paralelas ao fluxo de cavacos), principalmente com a deposição de lubrificante  $\text{MoS}_2$ . Os parâmetros da textura mais influentes na temperatura de usinagem (com índice de confiança de 95%) foram direção, condição de lubrificação e a velocidade de corte (este último se mostrou o parâmetro mais influente entre os estudados). As dimensões das texturas não apresentaram influência significativa para o planejamento fatorial estudado.

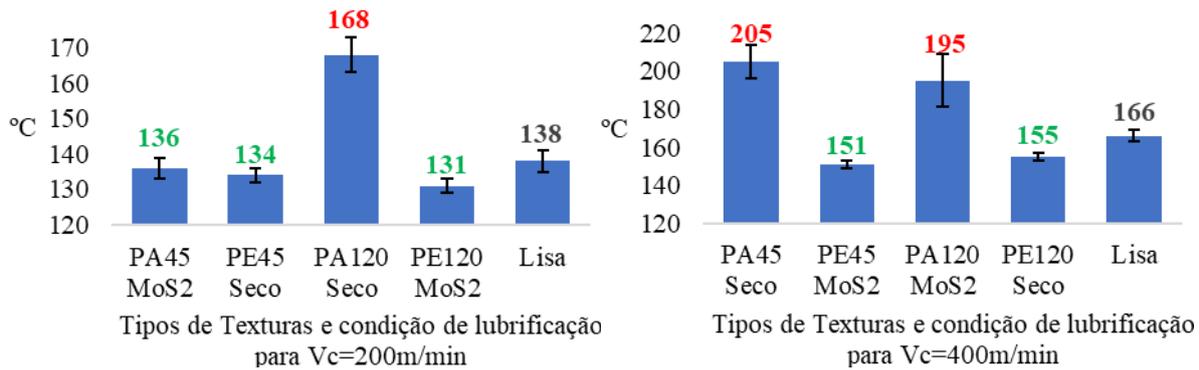


Figura 5 – Média das máximas temperaturas da superfície da ferramenta de corte. Os valores de temperatura em vermelho correspondem às arestas em que houve quebra da textura (e maior barra de erro).

#### 4. CONCLUSÕES

- Na usinagem de materiais dúcteis como o alumínio, as texturas paralelas à aresta de corte pioram os resultados, pois, o ancoramento do material é muito forte e pode causar trincas na aresta de corte. A direção das texturas ideal para este tipo de material é sem dúvida perpendicular à aresta de corte (paralela ao fluxo de cavacos);
- Os cavacos gerados na usinagem do alumínio se deformam excessivamente na presença de texturas na ferramenta de corte, causando um endurecimento e conseqüentemente uma fragilização desse cavaco. Quanto maiores as texturas, maior o endurecimento. Os cavacos que com ferramentas sem texturas apresentaram a forma helicoidal tubular curto, e ao utilizar ferramentas texturizadas passaram ser da forma de arcos soltos;
- A maior redução de temperatura comparado à ferramenta sem textura, foi de 9% para a textura tipo perpendicular com dimensão de 45  $\mu\text{m}$  com lubrificante MoS<sub>2</sub>.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Alagan, N.T. *et al.*, 2019, “Investigation of micro-textured cutting tools used for face turning of alloy 718 with high-pressure cooling”, *Journal of Manufacturing Processes*, v. 37, p. 606-616.
- Arslan, A. *et al.*, 2016, “Surface texture manufacturing techniques and tribological effect of surface texturing on cutting tool performance: a review”, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, v. 41, n. 6, p. 447-481.
- Dhage, S., Jayal, A.D. e Sarkar, P., 2019, “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.
- Gajrani, K.K. e Sankar, M.R., 2017, “State of the art on micro to nano textured cutting tools”, *Materials Today: Proceedings*, v. 4, n. 2, p. 3776-3785.
- Jesudass T.S. e Kalaichelvan, K., 2018, “Comparative study of the effect of surface texturing on cutting tool in dry cutting”, *Materials and Manufacturing Processes*, v. 33, n. 6, p. 683-694.
- Machado, A.R. *et al.*, 2021, “State of the art of tool texturing in machining”, *Journal of Materials Processing Technology*, p. 117096.
- Mishra, S.K., Ghosh, S. e Aravindan, S., 2019, “Performance of laser processed carbide tools for machining of Ti6Al4V alloys: a combined study on experimental and finite element analysis”, *Precision Engineering*, v. 56, p. 370-385.
- Samad, R.E. *et al.*, 2012, “Ultrashort laser pulses machining”, *Laser Pulses-Theory, Technology, and Applications*, p. 143-174.
- Sasi, R., Subbu, S.K. e Palani, I.A., 2017, “Performance of laser surface textured high speed steel cutting tool in machining of Al7075-T6 aerospace alloy”, *Surface and Coatings Technology*, v. 313, p. 337-346.
- Sharma, V. e Pandey, P.M., 2016, “Recent advances in turning with textured cutting tools: a review”, *Journal of Cleaner Production*, v. 137, p. 701-715.
- Sun, J. *et al.*, 2016 “Effect of hybrid texture combining micro-pits and micro-grooves on cutting performance of WC/Co-based tools”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 86, n. 9, p. 3383-3394.

#### 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem seguintes apoios: Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e MAPAL.

#### 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.