

PROPOSTA PARA INVESTIGAR O TORNEAMENTO DE Ti6Al4V COM FERRAMENTAS DE METAL DURO TEXTURIZADAS A LASER

Felipe Chagas Rodrigues de Souza¹, felipechagas@ufu.br
Maria Alice de Oliveira¹, m.alice@ufu.br
Wagner de Rossi², wderossi@ipen.br
Denis Boing³, denis.boing@sandvik.com
Marcelo Kuroda⁴, m.kuroda@blaser.com
Álison Rocha Machado^{1,5}, alisson.rocha@pucpr.br

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

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

³ Sandvik Coromant, Stokolm, Sweden

⁴ Blaser Swisslube do Brasil Ltda, Santo André, SP, Brasil

⁵ 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. Este trabalho apresenta a proposta e resultados parciais de uma investigação do efeito de texturas produzidas por laser de femtossegundos na superfície de saída em ferramentas de metal duro no torneamento de Ti6Al4V com fluido aplicado em abundância. As forças de usinagem, rugosidade da peça, vida das ferramentas e morfologia e metalografia dos cavacos foram variáveis de saída consideradas. As variáveis de entrada foram a direção, dimensão e distância da aresta de corte das texturas, velocidade de corte, avanço e presença de lubrificante sólido (MoS₂) impregnado nas ferramentas. Esta pesquisa está sendo desenvolvida no LEPU (Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem) em parceria com o IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), que disponibilizou um equipamento laser com pulsos da ordem de femtossegundos de frequência, ideal para garantir a qualidade das texturas. O trabalho também conta com a colaboração da Sandvik Coromant (ferramental), e Blaser (fluidos de corte). A metodologia consiste na execução de 3 etapas de experimentos, buscando otimizar as variáveis de entrada em cada etapa, para ser aplicada na etapa posterior. Dessa forma serão realizados um planejamento fatorial completo 2⁴ (pré-testes com as variáveis de entrada selecionadas com base na literatura), seguido de um planejamento composto central 2⁴ (para definir o ponto ótimo dos valores das variáveis de entrada) e por fim um fatorial completo 2³ (para comparar a textura ótima com uma condição sem textura, acrescentando no estudo mais variáveis de saída). Atualmente a pesquisa está na fase de execução da segunda etapa. Neste trabalho é apresentado os resultados da primeira etapa. A presença de texturas reduziu as forças de usinagem e a rugosidade da peça em várias condições, indicando possíveis combinações para um ponto ótimo a ser estudado na segunda etapa. O mecanismo proveniente da interação entre textura e cavaco variou em diferentes faixas do avanço.

Palavras-chave: Texturização de ferramentas, Laser femtossegundos, Processo de torneamento, Ti6Al4V

1. INTRODUÇÃO

Um dos processos mais comuns na fabricação é a usinagem, que envolve a remoção de material na forma de cavaco. Nesse processo, uma ferramenta realiza o corte do material através de movimentos relativos. As ferramentas de corte podem ter geometria definida (torneamento, furação, fresamento, etc) ou indefinida (processos abrasivos) (Normung, 2003).

Na indústria metalmeccânica, o torneamento é uma das operações mais utilizadas devido à sua versatilidade (Klock e König, 2007). Este processo é amplamente estudado no corte de metais pela facilidade de obtenção de insumos, operação e instrumentação, representando cerca de 70% das publicações recentes sobre usinagem (Machado et al., 2015). Conseqüentemente, a indústria tem investido mais nesse processo para otimizá-lo. A eficiência do corte depende de vários parâmetros, incluindo características específicas da ferramenta de corte, como alta dureza à temperatura de trabalho, resistência ao desgaste e ausência de afinidade química com o material usinado.

Métodos que reduzem as forças de corte, o desgaste das ferramentas e/ou aumentam as velocidades de corte podem economizar energia e recursos. Exemplos de técnicas para aumentar a eficiência da ferramenta de corte incluem o endurecimento do material da ferramenta, a aplicação de revestimentos e a texturização da superfície de saída (Kawasegi et al., 2009), sendo esta última uma área menos explorada, mas com grande potencial (Machado et al., 2021).

A texturização de uma superfície cria padrões topográficos que alteram a interação dessa superfície com outras superfícies, beneficiando o processo de contato envolvido. Em ferramentas de corte, as texturas modificam as condições tribológicas na interface cavaco-ferramenta-peça, afetando o comportamento das forças (Lima, 2005). Antigamente, a texturização era pouco estudada devido à complexidade de sua produção e repetibilidade. No entanto, nas últimas décadas, a popularização do uso de lasers para texturização tornou a pesquisa nessa área mais acessível e atraente. As texturas podem reter resíduos de desgaste e prevenir a adesão, além de armazenar lubrificantes sólidos (Feng et al., 2017).

Visando melhorar a usinagem do titânio, um material nobre de baixa usinabilidade, este estudo investiga a aplicação de texturas produzidas por laser de femtossegundos em ferramentas de metal duro no torneamento da liga Ti6Al4V com fluido abundante. Serão analisadas as forças de corte, potência, rugosidade da peça, vida útil e desgaste das ferramentas de corte.

2. METODOLOGIA

Os experimentos estão sendo conduzidos no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, LEPU-UFU e os resultados analisados por métodos estatísticos. O material usinado é a liga de titânio grau 5 (Ti6Al4V), conhecida por suas notáveis propriedades e dificuldades durante a usinagem. As ferramentas são de metal duro sem cobertura, indicadas para a usinagem de ligas de titânio, código ISO SPUN120304, classe H13A, e o suporte CSDPR 2525 M12, fabricados pela Sandvik Coromant. A texturização pretende mitigar as dificuldades associadas à usinagem do titânio, aumentando sua viabilidade. Além disso, a texturização nesta aplicação é ainda pouco estudada, e o objetivo é encontrar as melhores combinações de parâmetros para melhorar a usinagem desse metal amplamente utilizado e importante.

Com base em toda a informação obtida na revisão bibliográfica e nos equipamentos disponíveis, foram propostas as melhores combinações de variáveis relacionadas às texturas para realizar a primeira etapa de experimentos, mesclando os trabalhos vistos na literatura que abordaram a usinagem de titânio com ferramentas texturizadas.

Os parâmetros de entrada foram planejados com a seguinte estratégia:

- Direção: textura em formas de canais lineares nas direções paralela e perpendicular à aresta principal de corte da ferramenta, conforme a literatura que sugere tal investigação como possível melhoria da usinabilidade.
- Dimensões dos canais (profundidade/largura/espacamento): parâmetros dos mais influentes no processo em se tratando de texturas. Foram analisadas duas profundidades diferentes, mantendo uma correlação com a largura e distanciamento entre as texturas, a fim de evitar um efeito acumulador de tensão, que poderia quebrar a ferramenta durante o corte.
- Distância da Aresta de Corte: uma variável pouco pesquisada na literatura é a distância do posicionamento da textura em relação à aresta principal de corte, mas com grande impacto no efeito da textura durante o corte. Foram utilizadas duas distâncias da aresta de corte.
- Avanço e Velocidade de corte: A usinagem será executada com um nível de valores considerados altos para a usinagem de ligas de titânio e com um segundo nível numa faixa usual e adequada às condições de corte.
- Lubrificação: O teste de vida será feito com aplicação de fluido de corte em abundância e com lubrificante sólido de MoS₂. Diversos autores citam a eficiência da textura (dependendo de suas dimensões) em reter lubrificante sólido. Buscando uma alternativa aos lubrificantes líquidos, que são em sua maioria nocivos ao meio ambiente, será estudada a aplicação de lubrificantes sólidos nas superfícies de saída das ferramentas, no caso o MoS₂. Este tipo de lubrificação contribuirá para uma usinagem mais sustentável.

Foi decidido realizar inicialmente 8 tipos diferentes de texturas (variando a direção, profundidade e distância da aresta principal de corte) e dois avanços diferentes, que serão experimentadas em testes de usinagem, configurados por um fatorial completo do tipo 2⁴, com réplica e tréplica dos testes. A variação do avanço é importante para explorar a variação do comprimento de contato cavaco-ferramenta. Além da combinação de ensaios citados, também serão realizados ensaios com ferramentas lisas nas mesmas condições de usinagem para comparações. Serão consideradas as seguintes variáveis de saída: componentes da força de usinagem, a rugosidade das superfícies usinadas, a morfologia dos cavacos e o grau de recalque.

Com a primeira etapa de ensaios concluída, se dará início à segunda etapa, quando será possível determinar um modelo para a força de usinagem e para a rugosidade da peça, em função de até 2 variáveis de textura (as duas mais influentes na primeira etapa) e do avanço. Com estes dados, será possível iniciar um planejamento composto central (PCC), capaz de determinar condições ótimas para duas variáveis utilizando técnicas de SRM (superfícies de respostas), considerando os modelos de força e rugosidade.

Na terceira etapa de experimentos, serão utilizadas as dimensões de textura e avanço ótimas obtidas no item anterior para investigar o efeito da velocidade de corte, a presença da textura (testes em ferramentas com e sem textura), e a aplicação de MoS₂, utilizando fluido em abundância (variando entre a presença ou não de MoS₂ aplicado na forma de pasta dentro da textura). Para tanto, será utilizado um planejamento fatorial completo 2³ e, somente nesta etapa, a vida da ferramenta será uma variável de saída estudada.

As texturas foram realizadas na superfície de saída da ferramenta, sendo produzidas por usinagem a Laser Femtossegundos (pulsos ultracurtos), usando um equipamento gerenciado pelo Prof. Dr. Wagner de Rossi (coorientador

deste projeto de doutorado) situado no Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares (IPEN-USP). Este equipamento possui precisão de 10 nm e ponto focal de 1,5 μm .

Após a caracterização e limpeza das texturas, as ferramentas estarão prontas para o início dos ensaios. Os pré-testes indicaram que o polimento das ferramentas de corte é desnecessário, pois o laser de femtossegundos não causou tensões residuais significativas nas superfícies texturizadas. Não houve trinca em nenhuma ferramenta de corte, mesmo nas condições de corte mais agressivas experimentadas neste estudo. Serão realizados ensaios com fluidos em abundância e lubrificante sólido (uma mistura de MoS_2 e adesivo silicone de alta temperatura) empastado dentro das texturas, para cada um dos oito tipos de texturas e dois níveis de velocidades.

Testes específicos serão desenvolvidos para estudar o comportamento das forças de usinagem e a rugosidade da peça. Nestes testes, deverão ser testadas as condições com fluido em abundância e com MoS_2 . As forças de corte serão medidas com o auxílio do dinamômetro Kistler 9265-B e a rugosidade do titânio pós-usinagem pelo rugosímetro Taylor Hobson S-128. Os cavacos serão coletados e analisados posteriormente, com auxílio de micrômetro, paquímetro, microscópios óptico e eletrônico de varredura (MEV), buscando definir o grau de recalque para as várias condições de corte analisadas.

A Tabela 1 apresenta os dados do planejamento experimental, que incorpora as variáveis relativas às geometrias das texturas das ferramentas utilizadas na etapa 1. Este planejamento experimental fornece uma estrutura detalhada das variáveis analisadas, permitindo uma interpretação precisa dos efeitos das diferentes texturas sobre o desempenho das ferramentas. As variáveis incluídas na tabela são fundamentais para compreender as interações e otimizações possíveis no processo de usinagem, destacando a importância do DOE (*design of experiment*) na obtenção de resultados confiáveis e aplicáveis. Ressalta-se que os níveis das variáveis de entrada selecionados para estas variáveis originam-se de uma média encontrada na literatura, em artigos recentes que estudaram o torneamento de titânio com ferramentas texturizadas. Os testes foram realizados com aplicação em abundância do fluido de corte Vasco 7000 da Blaser Swissslube, na concentração de 7 % e vazão de 10 l/min e pressão 1,2 bar.

Tabela 1. Planejamento experimental, com as 8 geometrias de texturas trabalhadas na primeira etapa do projeto.

Nº de condições	Tipos de Texturas	Variáveis da Textura			Variável do Corte
		Direção [°]	Distância Da Aresta De Corte [μm]	Dimensões: Profundidade, Largura e Espaçamento [μm]	Avanço [mm/rev]
1.1	T1.1	0	75	20-40-40	0,1
1.2	T1.2	90	75	20-40-40	0,1
1.3	T1.3	0	225	20-40-40	0,1
1.4	T1.4	90	225	20-40-40	0,1
1.5	T1.5	0	75	60-120-120	0,1
1.6	T1.6	90	75	60-120-120	0,1
1.7	T1.7	0	225	60-120-120	0,1
1.8	T1.8	90	225	60-120-120	0,1
1.9	T1.1	0	75	20-40-40	0,3
1.10	T1.2	90	75	20-40-40	0,3
1.11	T1.3	0	225	20-40-40	0,3
1.12	T1.4	90	225	20-40-40	0,3
1.13	T1.5	0	75	60-120-120	0,3
1.14	T1.6	90	75	60-120-120	0,3
1.15	T1.7	0	225	60-120-120	0,3
1.16	T1.8	90	225	60-120-120	0,3

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES DA ETAPA 1

Na Figura 1 são mostradas as imagens dos 8 tipos de texturas produzidas na superfície de saída das ferramentas de metal duro. Abaixo de cada imagem há uma identificação cujos códigos se referem respectivamente ao: nome do tipo de textura, ângulo dos canais em relação à aresta de corte, distância do início da primeira textura até a aresta de corte (em μm), profundidade do rasgo da textura (em μm), largura da textura (em μm) e distanciamento entre as texturas (em μm). As texturas foram produzidas em uma área de 3 mm x 3 mm, ou 9 mm², suficiente para cobrir a área de contato do cavaco na superfície da saída da ferramenta. Não houve sinal de trincas ou verificação de zonas afetadas pelo calor durante a texturização pelo laser.

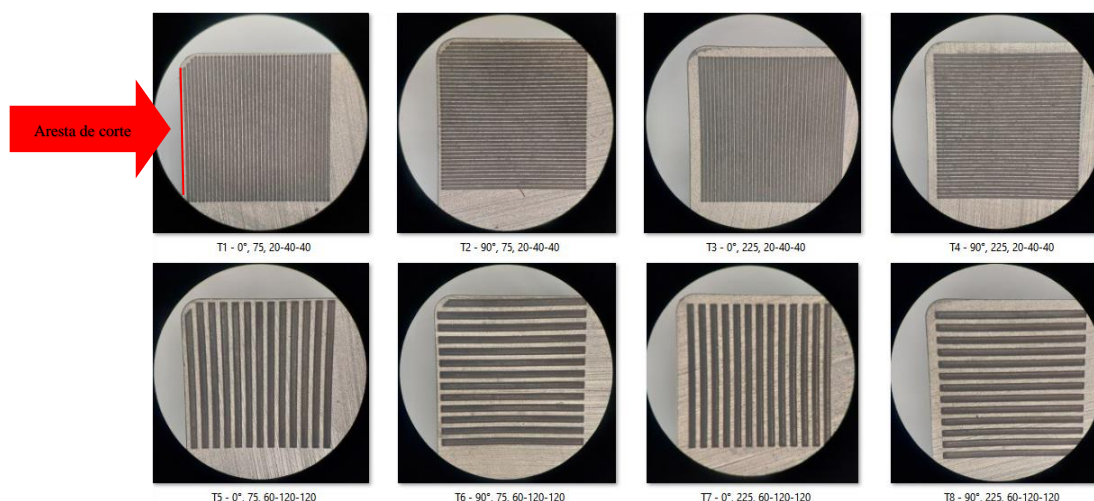


Figura 1. Imagens dos 8 tipos de texturas, com os valores de suas variáveis: direção do rasgo, distância da aresta de corte, profundidade, largura e distanciamento (em μm). A seta vermelha na textura “T1” indica a aresta principal de corte.

Nas Figura 2 e 3 são apresentados os gráficos com os resultados de força de usinagem F_u (soma vetorial das três componentes: Força de corte, F_c ; Força de avanço, F_f ; força passiva, F_p) e rugosidade R_a , respectivamente. A linha laranja, indica o resultado obtido com uma ferramenta lisa (sem textura) utilizada nas mesmas condições de corte das ferramentas texturizadas. Velocidade de corte de 70 m/min, profundidade de corte de 1 mm e avanços de 0,1 e 0,3 mm/rev. As barras vermelhas indicam condições em que as texturas pioraram os resultados em relação aos resultados de uma ferramenta lisa. Já as barras verdes são as condições em que a texturas melhoraram os resultados. A variação do avanço teve grande impacto na escala dos resultados, e assim os gráficos foram separados para os dois avanços estudados.

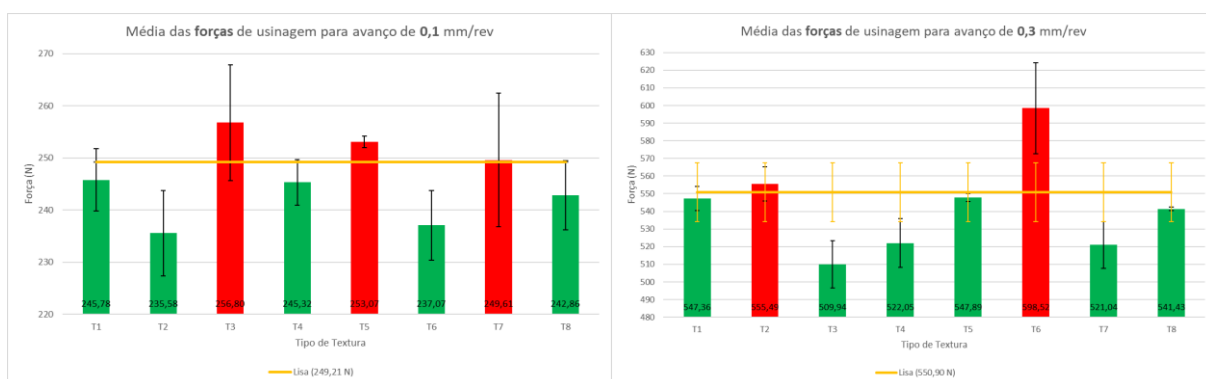


Figura 2. Resultados de força de usinagem.

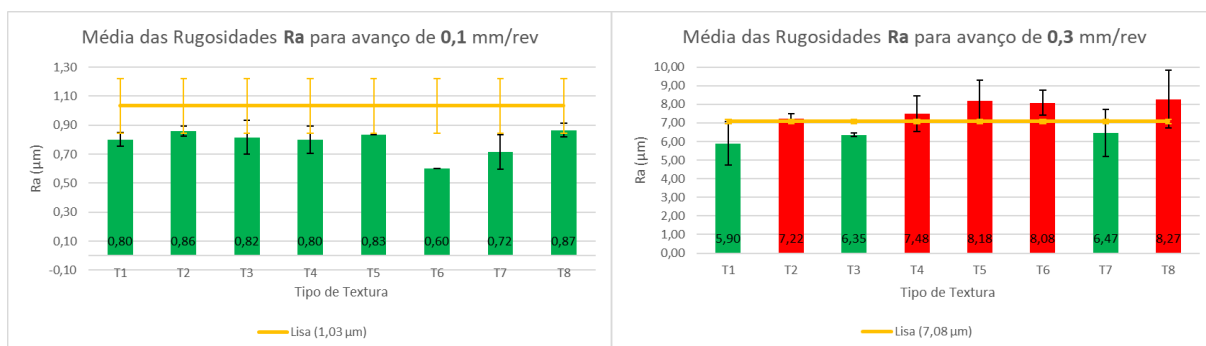


Figura 3. Resultados da rugosidades R_a .

Nota-se que apenas a textura tipo 1 melhorou todos resultados (força e rugosidade) para todas faixas de usinagem (alta e baixa). Todas as texturas melhoraram a rugosidade da peça no torneamento com o menor avanço. Observa-se que não houve a tendência em mesmo tipo de textura ter comportamento semelhantes nos dois avanços testados. Isso indica que o efeito da textura pode variar não só para diferentes materiais usinados, como já constatado na literatura (Machado et al., 2021), mas também em diferentes faixas do avanço para um mesmo material (como exemplificado na usinagem do

titânio). Devido a algumas propriedades do titânio como baixa condutividade térmica, alta reatividade química, baixo módulo de elasticidade, a variação do avanço tem um impacto significativo durante sua usinagem. Um maior avanço gera um cavaco com maior encruamento, maior comprimento no contato cavaco-ferramenta, maior pressão na zona de cisalhamento do cavaco e ainda maior espessura no cavaco. Neste estudo a variação do avanço abrangeu extremos com uma diferença nominal que triplica o valor do avanço.

Os principais efeitos que a textura pode exercer são redução da área de contato efetiva, retenção de lubrificante e debris, e alterações nos efeitos do cisalhamento, adesão e ancoramento. Todos estes podem ser impactados pelas características dos cavacos que estão fluindo sobre as texturas. Assim, somando as características do titânio, a grande variação no avanço gera efeitos na formação do cavaco de tal forma que o efeito da textura sobre o fluxo de cavacos é diferente para cada faixa de avanço. Tal hipótese condiz com os resultados apresentados, em que uma mesma textura pode gerar resultados diferentes alterando unicamente o avanço do corte durante a usinagem.

Após análises estatísticas, foi constatado que para a próxima etapa do projeto, o planejamento composto central irá estudar estas mesmas variáveis com excessão das dimensões das texturas. Na faixa de dimensões estudadas, o impacto no resultado foi mínimo, e então na próxima etapa este parâmetro será fixado em seu menor valor (houve uma pequena tendência para melhores resultados em dimensões menores).

4. CONCLUSÕES

- Nesta primeira etapa do projeto foi comprovado que texturizar ferramentas de corte favorecem a usinagem do titânio, desde que a textura esteja dimensionada corretamente para a faixa de trabalho da usinagem.
- O laser de femtossegundos produziu texturas de excelentes qualidades, isento de danos à ferramenta de corte, para quaisquer geometrias e dimensões aqui estudadas.
- O efeito da textura no fluxo de cavacos pode variar para diferentes faixas de avanço.
- As texturas tipo 1 não apresentaram os melhores resultados, mas foram melhores que a ferramenta lisa em todas as condições de corte testadas. Os percentuais de melhorias nas forças de usinagem foram 1,38% e 0,64% para baixo e alto avanço, respectivamente; na rugosidade, os percentuais são 22,58% e 16,71% para baixo e alto avanço, respectivamente.
- Os melhores resultados das texturas, quando comparada com a ferramenta lisa, foram: texturas tipo 2 para força em baixo avanço com 5,47%, texturas tipo 3 para força em alto avanço com 7,44%, texturas tipo 7 para rugosidade em baixo avanço com 30,65% e texturas tipo 1 para rugosidade em alto avanço com 16,71%.
- O planejamento experimental proposto na etapa é suficiente para servir de base para a segunda etapa do projeto, o qual propõe um planejamento composto central, a fim de otimizar a geometria da textura para um tipo único de textura, para uma determinada combinação de variáveis de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte).

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 Al₂O₃-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.