

PLANO DE TRABALHO: TORNEAMENTO DE Ti6Al4V COM FERRAMENTAS TEXTURIZADAS POR LASER FEMTOSSEGUNDOS

Felipe Chagas Rodrigues De Souza, UFU, felipechagas@ufu.br
Álison Rocha Machado, UFU / PUC-PR, alissonr.machado@gmail.com
Wagner de Rossi, IPEN, wderossi@gmail.com

Resumo. Este plano de trabalho tem objetivo de investigar o efeito de texturas produzidas na superfície de saída por laser de femtossegundos em ferramentas de metal duro no torneamento de Ti6Al4V com fluido e aplicado em abundância. Serão consideradas as forças de corte de usinagem, a potência, a rugosidade da peça, a vida e desgaste das ferramentas de corte e morfologia e metalografia dos cavacos. Enquanto que as variáveis de entrada serão direção, dimensão e distância da aresta de corte para as condições das texturas e velocidade, avanço e presença de lubrificante sólido (MoS_2) para as condições de corte na usinagem. Esta pesquisa será desenvolvida no LEPU (Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem) em parceria com o IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), que disponibilizará um equipamento de 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 (ferramentas de corte e suporte), e Blaser (fluidos de corte). A metodologia consiste na execução de 3 etapas de experimentos, a qual os resultados obtidos buscam otimizar as variáveis de entrada para a etapa posterior. Dessa forma serão realizados um planejamento fatorial completo 2^4 (pré-testes com as variáveis de entrada selecionadas com base na literatura), seguido de um central composto 2^4 (para definir o ponto ótimo dos valores das variáveis de entrada) e por fim um fatorial completo 2^3 (para comparar a textura ótima com uma condição sem textura, acrescentando no estudo mais variáveis de saída).

Palavras-chave: texturização, laser femtossegundos, torneamento, titânio, , usinagem.

1. INTRODUÇÃO

Um dos processos mais comuns na fabricação é a usinagem, definida como um processo em que há remoção de material, o qual recebe o nome de cavaco. Durante o processo usinagem, uma ferramenta será responsável por cisalhar o material por meio de movimentação relativa, gerando o processo de corte. A respeito da ferramenta de corte, existem os tipos de geometria definida e indefinida (Normung, 2003).

Na indústria metalmeccânica, o processo de torneamento é umas das operações mais trabalhadas por ser um processo versátil (Klock e König, 2007). Em se tratando de estudos de corte de metais, o torneamento também é um dos processos mais investigados pela facilidade de aquisição de insumos, operação e instrumentação, representando então 70% de todas últimas publicações a respeito de processos de usinagem (Machado *et al.*, 2015).

Por consequência, fabricantes vêm investindo cada vez mais neste processo, buscando otimizá-lo. A eficiência do processo de corte depende de vários parâmetros, sendo dentre eles alguns exclusivos da ferramenta de corte, como por exemplo: alta dureza na temperatura de trabalho, não possuir afinidade química com o material usinado, resistência aos mecanismos de desgaste presentes no processo, etc. Dessa maneira, métodos que são capazes de reduzir forças no processo de corte, desgaste das ferramentas, e/ou aumento das velocidades de corte, são meios que por finalidade geram uma economia de energia e recursos para os fabricantes.

Endurecimento do material da ferramenta, produção de camadas de revestimento ou mesmo texturizar a superfície de saída são exemplos de técnicas capazes de aumentar a eficiência da ferramenta de corte (Kawasegi *et al.*, 2009), sendo este último, uma área de estudo ainda pouco estudada, apesar de ser uma técnica já antiga. Logo dentre estes exemplos, a texturização tem uma grande demanda de investigação.

Texturização de uma superfície é a produção de padrões topográficos com capacidade de alterar a interação desta superfície com outras superfícies sem tais padrões, de tal forma que a presença dela seja capaz de beneficiar o processo de contato envolvido. Quando presente na superfície de ferramentas, as texturas alteram o fenômeno tribológico do contato do material da peça e da ferramenta, alterando as condições tribológicas na interface cavaco-ferramenta-peça, incluindo o comportamento das forças presentes (Lima, 2005).

Inicialmente, o processo de texturização foi pouco estudado por ser um processo de produção complicado, com técnicas de difícil repetibilidade. Entretanto, nas últimas décadas, a popularização das técnicas de texturização com uso de laser possibilitou pesquisas envolvendo texturas algo mais comum e atraente.

Um efeito positivo das texturas é a capacidade de reter resíduos de desgaste, e evita o efeito de adesão. Também destaca-se a capacidade de armazenar resíduos, podem armazenar lubrificantes sólidos (Feng *et al.*, 2017).

Nesta linha, buscando otimizar a usinagem do titânio, um material nobre mas de baixíssima usinabilidade, será estudado a aplicação de texturas nas ferramentas de corte. Portanto será investigado o efeito de texturas produzidas na superfície de saída por laser de femtossegundos em ferramentas de metal duro no torneamento de Ti6Al4V com fluido e aplicado em abundância. Serão consideradas as forças de corte de usinagem, a potência, a rugosidade da peça, a vida e desgaste das ferramentas de corte.

2. METODOLOGIA

Este projeto busca realizar estudos baseados em experimentação, as quais serão fundamentadas em trabalhos anteriores que buscaram estudar os efeitos da texturização em usinagem. Os experimentos serão desenvolvidos no LEPU-UFU, e a análise dos resultados será realizada com métodos estatísticos.

O material escolhido para o estudo é a liga de titânio, grau 5 (Ti6Al4V), que possui vantagens e desvantagens durante a usinagem. O uso de texturas busca amenizar as dificuldades na usinagem do titânio, tornando então sua utilização ainda mais viável. Outro fator motivador é que as texturas nesta aplicação ainda são pouco estudadas e busca-se aqui uma resposta para as melhores combinações de parâmetros para aprimorar a usinagem deste metal tão importante e amplamente utilizado.

A seguir serão descritas as etapas que envolvem toda a metodologia da pesquisa, conforme o fluxograma da Figura 1.

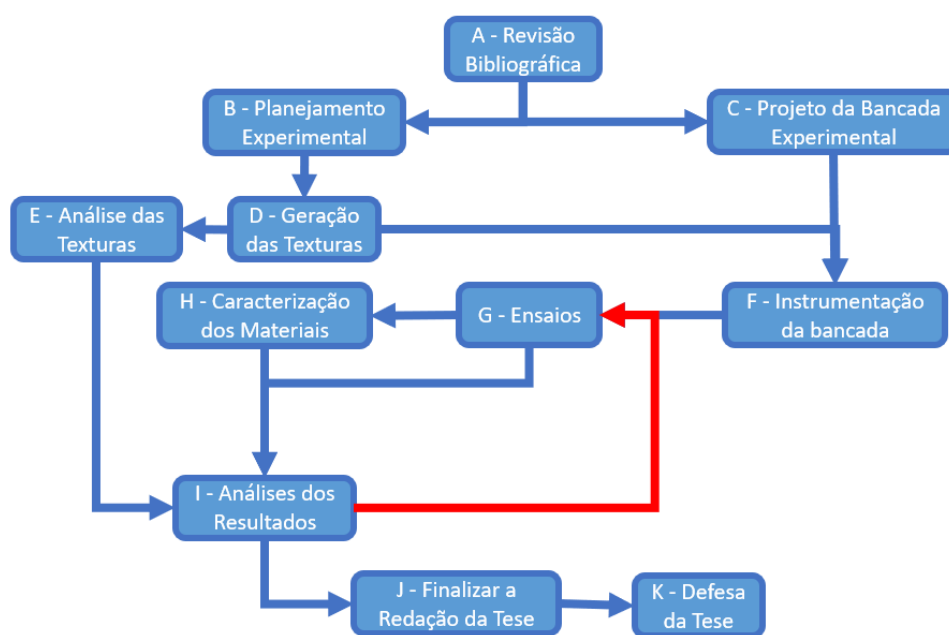


Figura 1 - Fluxograma das etapas do projeto. A seta vermelha indica um retorno à etapa de experimentos, pois serão 3 etapas de experimentos (ver item 2.2).

2.1 ETAPA A - Revisão bibliográfica

A maior parte da revisão bibliográfica foi desenvolvida no início do doutorado, porém novas consultas serão realizadas no decorrer do trabalho, sempre buscando referências modernas sobre os assuntos para atualização. O autor do projeto já está familiarizado com o tema de texturização na usinagem, pois já desenvolveu o mestrado nesta área, e ao realizar uma revisão dos principais artigos publicados nos últimos anos no tema, publicou, junto com seu orientador e coautores, um artigo Review sobre ferramentas texturizadas (Machado *et al.*, 2021).

2.2 ETAPA B - Planejamento experimental

Com base em toda a informação obtida na revisão bibliográfica, e nos equipamentos disponíveis, serão 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 sobre a seguinte estratégia:

- **Direção:** realizar a 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 prováveis otimizadoras da usinabilidade.
- **Dimensões (profundidade/largura/espacamento):** é um dos parâmetros mais influentes no processo em se tratando de texturas, logo serão analisadas 2 profundidades diferentes, mantendo uma correlação com a largura e distanciamento entre as texturas, a fim de evitar que haja um efeito de acumulador de tensão, o qual podem quebrar a ferramenta durante o corte. Os níveis serão definidos em pré-testes da usinagem das texturas a laser.

- Distância da Aresta de Corte: Uma variável pouco pesquisada na literatura, mas com grande impacto no efeito da textura durante o corte. Serão utilizadas duas distâncias da aresta de corte, cujos níveis serão definidos em pré-testes da usinagem das texturas a laser
- Avanço e Velocidade: a usinagem será feita com a valor considerado alto para a usinagem de ligas de titânio e com um segundo valor numa faixa usual e adequada às condições de corte (a serem definidas em pré-testes).
- 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 em conter lubrificante sólido (dependendo de suas dimensões). Assim, buscando uma alternativa aos lubrificantes líquidos, que são em sua maioria nocivos ao meio ambiente, será estudado a aplicação de lubrificantes sólidos nas superfícies de saída das ferramentas, no caso o MoS₂. Este tipo de lubrificação irá corroborar para uma usinagem mais sustentável. Assim, o fatorial 2³ será realizado com o fluido de corte aplicado em abundância e alternando a presença ou ausência de MoS₂ impregnado nas texturas.

Assim, 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 fracionado 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. É importante ressaltar que 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 grau de recalque.

Com a primeira etapa de ensaios concluída, 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), o qual é capaz de determinar duas condições ótimas para duas variáveis utilizando técnicas de SRM (superfícies de respostas), considerando os modelos do item anterior (de força e rugosidade).

Na terceira etapa de experimentos serão utilizadas as dimensões de textura e avanço ótimas obtidas no item anterior para então investigar o efeito de 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 2³ e a somente nesta etapa que a vida da ferramenta será uma variável de saída estudada.

2.3 ETAPA C - Projeto da bancada experimental

Esta etapa será usada para preparar os experimentos de usinagem, em ações que precedem os testes, com busca de todos os insumos necessários para realizar a investigação experimental dentro do cronograma. Recursos indisponíveis serão orçados para possíveis aquisições. Ao fim desta etapa será identificada a disponibilidade dos recursos, agendamento e cronograma. O principal insumo deste projeto é a barra de titânio, que já foi adquirida pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU, por solicitação do orientador do projeto, restando a aquisição de ferramentas de corte (classe S) e suporte, reagente para ataque em amostra da peça de titânio e também de cavacos, para caracterização metalográfica (ácido fluorídrico), e recurso para envio das ferramentas por uma empresa transportadora para a sua texturização no IPEN-SP. É provável que teremos a necessidade de despesas com passagens e diárias para o aluno ir pessoalmente a São Paulo acompanhar a texturização das ferramentas, pois algumas informações necessárias para a texturização poderão requerer a presença dele. Isto também facilitará a descrição dos procedimentos de texturização na tese. Com relação às ferramentas e suportes, iremos contatar empresas parceiras do LEPU para tentar conseguir a doação delas, com grandes chances de sucesso.

2.4 ETAPA D - Geração das Texturas

As texturas serão realizadas na superfície de saída da ferramenta, sendo produzidas por usinagem a Laser Femtossegundos (pulsos ultracurtos), usando equipamento que será gerido pelo Prof. Dr. Wagner de Rossi (coorientador) situado no Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares IPEN-USP. Este equipamento possui precisão de 10 nm e ponto focal de 1,5 μm.

Os parâmetros para as texturas são:

- Geometria das texturas: canais lineares
- Direção das texturas: paralelo e perpendicular à aresta de corte)
- Distância da aresta de corte: a determinar (2 tipos)
- Largura e profundidade das texturas: a determinar (2 tipos)
- Distância entre as texturas: igual à largura das texturas

Portanto serão 8 tipos de texturas diferentes (2 direções, 2 profundidades/larguras dos canais e 2 distâncias da aresta de corte). A Figura 2 exemplifica a superfície de saída de uma ferramenta de corte texturizada.

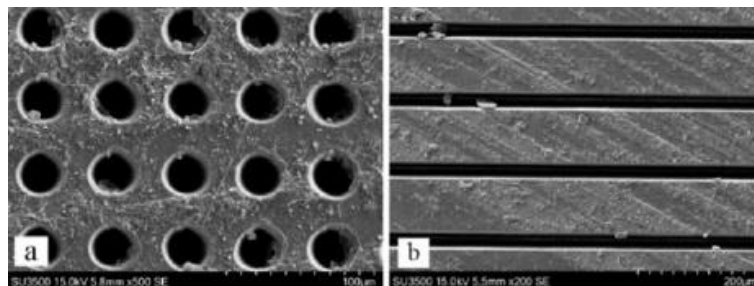


Figura 2 – a) Textura do tipo dimples; b) textura do tipo canal (Zhang *et al.*, 2019).

2.5 ETAPA E - Análises das Texturas (topográficas, microscópicas e químicas)

Para esta etapa, as texturas serão analisadas (e reanalisadas após a usinagem) por meio das seguintes técnicas:

- Microscopia ótica: objetivo de visualizar e ilustrar as texturas produzidas e então explicar a diferença entre os tipos desenvolvidos (foco em direção e geometria das texturas)
- Perfilometria 3D: Com software MountainsMap conferir as dimensões produzidas, e se estão dentro dos valores médios esperados, condizentes com a precisão do laser (foco em profundidade, largura e distanciamento das texturas)
- Análise Química: Feita por MEV e EDS, a definição da composição química irá guiar a etapa de polimento e limpeza das texturas antes e após a usinagem.

2.6 ETAPA F - Instrumentação da bancada

Aqui, serão reservados todos os equipamentos a serem utilizados simultaneamente para os testes de usinagem. Os ensaios acontecerão no LEPU-UFU. O torno Romi CNC Multiplic 35D será o principal equipamento, sendo então o restante da bancada montada junto ao torno (dinamômetro, amplificador, etc.).

2.7 ETAPA G – Ensaios

Após a caracterização das texturas e sua limpeza e polimento para redução de possíveis tensões residuais, as ferramentas estão prontas para o início dos ensaios.

Serão realizados ensaios com fluidos em abundância e com lubrificante sólido de MoS₂ dentro das texturas, para cada um dos 4 tipos de texturas e 2 valores de velocidades. Para cada teste, serão realizados uma série de medidas, buscando montar uma base com quantidade suficiente de dados para calcular um valor médio em cada parâmetro analisado.

Primeiramente serão realizados “pré-testes” com as ferramentas lisas, que darão uma base que poderão guiar possíveis alterações nos ensaios com ferramentas texturizadas (definição de parâmetros e condições de ensaios). Obviamente, as condições iniciais serão adotadas seguindo orientações do fabricante da ferramenta e artigos científicos e experiência prévia do orientador.

Serão realizados testes de vida, seguindo orientações da norma ISO 3685 (1997), com todos os tipos de texturas e com ferramentas sem texturas, para comparações, na condição com fluido em abundância e com MoS₂. Amostras de cavacos serão coletados no início e no final dos testes, para estudo, e a rugosidade da peça deverá ser monitorada durante todo o ensaio.

Testes específicos serão desenvolvidos, para estudar o comportamento das forças de usinagem. Nestes testes, deverão ser testadas as condições com fluido em abundância e com MoS₂. 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.

2.8 ETAPA H - Caracterização dos materiais

O titânio utilizado na fabricação são barras cilíndricas de base circular oriundas de extrusão. Devido ao método de fabricação, a microestrutura do material pode ter pequenas variações em certas regiões das barras. Estes ensaios deverão ser conduzidos após os ensaios de usinagem, pois o material nobre como o titânio tem valor muito elevado, inviabilizando a retirada de uma amostra na barra original no início. Essa amostra será retirada da barra após a usinagem, portanto. Assim sendo, serão realizados ensaios que irão caracterizar de forma mais específica os materiais estudados neste projeto, cumprindo-se então ensaios como:

- Dureza e microdureza nos materiais estudados, com equipamentos disponíveis na LTAD-UFU. O procedimento será padrão, com identificações e diferentes regiões, buscando uma média.
- Micrografia para definir informações sobre o tipo de grão no material usinado. Embutimento, lixamento, ataque, polimento e microscopia com equipamentos disponíveis no LTAD-UFU.
- Análise da composição química dos materiais, utilizando tanto informações do fabricante quanto a validação delas no laboratório IQ-UFU.

2.9 ETAPA I - Análises dos resultados

Nesta etapa, um tratamento de dados será feito para permitir analisar os resultados obtidos nos ensaios. Análise de variância (ANOVA) será realizada para determinar a interdependência das variáveis de entrada abordadas e seu grau de influência nos resultados. Nesta etapa também serão analisadas as variáveis de saída já citadas (força, rugosidade, morfologia do cavaco, etc.) e também os mecanismos de desgaste das ferramentas, após o teste de vida. Assim sendo, será possível uma clara discussão dos resultados, que deixarão evidente se há viabilidade na produção de texturas na usinagem da liga de titânio estudada. Aqui espera-se reavaliar os resultados esperados baseados na literatura e interpretar o projeto em si, já encaminhando para uma conclusão final. Na literatura há casos em que o uso de ferramentas texturizadas favorece alguns parâmetros mas desfavorece outros, o que varia dentre diversos tipos de texturas. Ao início deste trabalho, haverão 8 tipos de texturas, e ao fim apenas 1 único tipo otimizado. Desta maneira espera-se que o resultado da etapa final defina a viabilidade do uso de ferramentas texturizadas na usinagem de titânio. Também serão analisados os possíveis mecanismos que as texturas implicam durante o corte, como por exemplo redução da área de contato entre cavaco e ferramenta, redução do atrito devido o lubrificante sólido, deformação e escoamento do cavaco. Todos estes mecanismos são citados na literatura, mas para cada condição de usinagem e tipo de textura há uma resposta diferente, e que para o torneamento de titânio ainda não está bem definida.

2.10 ETAPA J - Finalizar a redação da tese

A tese será produzida aos poucos ao longo de todo o desenvolvimento do projeto, com finalização prevista para o final do ano de 2025. Paralelamente serão produzidos artigos científicos baseados nos resultados encontrados.

2.11 ETAPA K - Defesa da tese

Prevista para o fim do segundo semestre letivo de 2025.

3. REFERÊNCIAS

- Feng, Yihua, 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.
- ISO 3685, 1997. "Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools".
- Kawasegi, Noritaka, 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. "Fertigungsverfahren 3: Abtragen, Generieren Laser material bearbeitung", VDI-Buch, Springer-Verlag, Berlin, 389p.
- Lima, Milton Sergio Fernandes de., 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., & da Silva, M. B., 2015. Teoria da usinagem dos materiais. Editora Blucher.
- Machado, Á. R., da Silva, L.R.R., de Souza, F.C.R, et al., 2021. "State of the art of tool texturing in machining". *Journal of Materials Processing Technology*, p. 117096.
- Normung, D. I. für., 2003. "DIN 8589-Fertigungsverfahren Spanen. In Teil 11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug: Einordnung, Unterteilung, Begriffe". Beuth Verlag Berlin.
- Zhang, Zhao et al., 2019. "Friction-reducing effect and damage mechanism of laser micro-texture on diamond films during friction". *Modern Physics Letters B*, v. 33, n. 24, p. 1950283.

4. AGRADECIMENTOS

Agradecemos: FAPEMIG, Sandvik, Blaser e FEMEC e todos professores e técnicos envolvidos.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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