



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Faculdade de Engenharia Mecânica

FELIPE CHAGAS RODRIGUES DE SOUZA

**Torneamento de Ti6Al4V com Ferramentas Texturizadas
por Laser de Femtossegundos**

Uberlândia – MG

2026

FELIPE CHAGAS RODRIGUES DE SOUZA

Torneamento de Ti6Al4V com Ferramentas Texturizadas por Laser de
Femtosegundos

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia como parte dos requisitos para
obtenção do título de **doutor em engenharia
mecânica**

Área de concentração: Materiais e Processos de
Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Coorientador: Prof. Dr. Wagner de Rossi

Uberlândia – MG

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S729t
2026

Souza, Felipe Chagas Rodrigues de, 1992-
Torneamento de Ti6Al4V com Ferramentas Texturizadas por Laser de
Femtosegundos [recurso eletrônico] / Felipe Chagas Rodrigues de Souza. --
2026.

Orientador: Álisson Rocha Machado.

Coorientador: Wagner de Rossi.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-
graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2026.11011>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia Mecânica. I. Machado, Álisson Rocha, 1956-, (Orient.). II.
Rossi, Wagner de, 1957-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

André Carlos Francisco
Bibliotecário(a)-Documentalista - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-
MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, nº 425, PPGEM				
Data:	11/08/2026	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	13:00
Matrícula:	12213EMC005				
Nome do Discente:	Felipe Chagas Rodrigues de Souza				
Título do Trabalho:	Torneamento de Ti6Al4V com Ferramentas Texturizadas por Laser de Femtossegundos				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Usinagem de Ti6Al4V com ferramentas de metal duro texturizadas a laser				

Reuniu-se por videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Prof. Dr. Anderson Clayton Alves de Melo - UFRN; Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão - UFMG; Prof. Dr. Washington Martins da Silva Jr - UFU; Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva - UFU; Prof. Dr. Wagner de Rossi - IPEN (coorientador) e Prof. Dr. Álisson Rocha Machado - UFU/PUCPR; orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Álisson Rocha Machado, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar, foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 11/08/2026, às 13:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 11/08/2026, às 13:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wagner de Rossi, Usuário Externo**, em 11/08/2026, às 13:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALISSON ROCHA MACHADO, Usuário Externo**, em 11/08/2026, às 13:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE MENDES ABRAO, Usuário Externo**, em 11/08/2026, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANDERSON CLAYTON ALVES DE MELO, Usuário Externo**, em 12/08/2026, às 14:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7514175** e o código CRC **FB4D03CF**.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Sr. Marcos Antonio Rodrigues de Souza, por sempre ter me apoiado em meus estudos.

Ao meu orientador, prof. Dr. Álisson Rocha Machado, pelos seus ensinamentos.

Ao meu coorientador, prof. Dr. Wagner de Rossi, e a toda sua equipe do IPEN-CNEN, que tornaram possível a realização deste projeto.

Ao colega Dr. Lucas Melo Queiroz Barbosa, pelo grande apoio e companheirismo durante a jornada.

Às empresas Sandvik Coromant, em especial ao Dr. Denis Boing, e Blaser Swisslube, em especial ao Sr. Marcelo Kuroda, as quais tiveram participação essencial no fornecimento de insumos deste projeto.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro ao discente, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao laboratório.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), ao Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) e ao Laboratório Multiusuário do Instituto de Química (LAMIQ) pela infraestrutura para os experimentos.

Por último, agradeço também a toda a comunidade que compõe a UFU, incluindo professores e técnicos, além de colegas, que colaboraram de alguma forma para este trabalho.

Não é o ofício em si que torna o homem digno, mas a forma como ele o exerce.

— Paráfrase inspirada nas ideias de Sócrates, apresentadas por Platão em

***A República*, (Livro I, 342e–347a).**

RESUMO

A usinagem da liga de titânio Ti6Al4V apresenta desafios significativos devido à sua elevada resistência mecânica específica, baixa condutividade térmica, alta reatividade química, alta tendência à adesão e desgaste acelerado da ferramenta de corte. Nesse contexto, a texturização superficial de ferramentas de corte tem sido investigada como uma estratégia promissora para modificar as condições tribológicas na interface cavaco-ferramenta e melhorar o desempenho do processo de usinagem, sobretudo aumentando a vida das ferramentas. Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar a influência de microtexturas produzidas na superfície de saída de da ferramentas de metal duro durante o torneamento da liga Ti6Al4V, avaliando seus efeitos sobre as forças de usinagem, a rugosidade superficial da peça e a vida da ferramenta. O estudo foi conduzido em três etapas experimentais. Na primeira etapa, diferentes geometrias de microtexturas foram avaliadas por meio de um planejamento experimental com o objetivo de identificar os parâmetros geométricos de maior influência sobre o processo de usinagem. Nessa etapa, algumas configurações apresentaram melhorias significativas no acabamento superficial, com reduções de até 41,94% na rugosidade média (R_a) em relação à ferramenta lisa, além de reduções de até 8,64% nas forças de usinagem. Na segunda etapa, foi realizado um refinamento dos parâmetros geométricos das texturas selecionadas, visando à otimização da geometria das microrranhuras. Os resultados indicaram que determinadas configurações permitiram alcançar reduções adicionais nas forças de corte, chegando a 8,02% de diminuição em comparação com a ferramenta convencional, e 6,80% para a rugosidade. Na terceira e última etapa, a geometria de textura otimizada foi comparada com uma ferramenta lisa e com variações contendo lubrificante sólido MoS_2 , avaliando seu desempenho em condições de acabamento e desbaste. Os resultados mostraram que, em condições de acabamento, ferramentas texturizadas sem lubrificante apresentaram redução de 4,3% nas forças de usinagem, enquanto em condições de desbaste a combinação entre textura e MoS_2 resultou em reduções de até 57,9% nas forças de usinagem. Em relação à rugosidade superficial, foram observadas melhorias de até 8% na operação de acabamento, dependendo da condição de usinagem. A análise da vida da ferramenta indicou que as ferramentas texturizadas sem lubrificante sólido apresentaram o melhor desempenho geral, alcançando maiores volumes de material removido antes de atingir o critério fim de vida, sendo em média aumento de 58% em condição de acabamento e 24% para desbaste em relação à uma ferramenta sem textura.

Palavras-chave: Texturização a laser; Ferramentas texturizadas; Ti6Al4V; Usinabilidade; Vida da ferramenta; MoS_2 .

ABSTRACT

The machining of the Ti-6Al-4V titanium alloy presents significant challenges due to its high specific strength, low thermal conductivity, high chemical reactivity, strong tendency toward adhesion, and accelerated cutting-tool wear. In this context, surface texturing of cutting tools has been investigated as a promising strategy for modifying the tribological conditions at the tool–chip and tool–workpiece interfaces and improving machining performance, particularly by extending tool life. Therefore, this study aimed to investigate the influence of microtextures produced on the rake face of cemented carbide tools during the turning of Ti-6Al-4V, evaluating their effects on machining forces, workpiece surface roughness, and tool life. The study was conducted in three experimental stages. In the first stage, different microtexture geometries were evaluated through an experimental design to identify the geometric parameters with the greatest influence on the machining process. At this stage, some configurations significantly improved the surface finish, reducing the average surface roughness (Ra) by up to 41.94% compared with the untextured tool, in addition to reducing machining forces by up to 8.64%. In the second stage, the geometric parameters of the selected textures were refined to optimize the microgroove geometry. The results indicated that certain configurations provided additional reductions in cutting forces, reaching a decrease of 8.02% compared with the conventional tool, as well as a 6.80% reduction in surface roughness. In the third and final stage, the optimized texture geometry was compared with an untextured tool and with textured-tool variants containing MoS₂ solid lubricant under finishing and roughing conditions. The results showed that, under finishing conditions, textured tools without lubricant reduced machining forces by 4.3%, whereas, under roughing conditions, the combination of texture and MoS₂ resulted in reductions of up to 57.9% in machining forces. Regarding surface roughness, improvements of up to 8% were observed during finishing, depending on the machining condition. Tool-life analysis indicated that textured tools without solid lubricant exhibited the best overall performance, achieving greater volumes of removed material before reaching the end-of-tool-life criterion, with average increases of 58% under finishing conditions and 24% under roughing conditions.

Keywords: Laser texturing; Textured tools; Ti6Al4V; Machinability; Tool life; MoS₂.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Objetivo Geral.....	10
1.2 Objetivos Específicos	10
1.3 Estrutura do Trabalho	11
1.4 Declaração de Uso de Inteligência Artificial	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Usinagem e Torneamento.....	13
2.2 Titânio e sua liga Ti6Al4V	16
2.3 Ferramentas de corte de Metal Duro (WC-Co).....	19
2.4 Texturas em Ferramentas de Corte	22
2.4.1 <i>Geometria das Texturas</i>	<i>23</i>
2.4.2 <i>Dimensões das Texturas e Seus Efeitos na Usinagem</i>	<i>25</i>
2.4.3 <i>Características Tribológicas Resultantes das Texturas</i>	<i>27</i>
2.4.4 <i>Redução do Efeito de Adesão na Ferramenta Texturizada</i>	<i>29</i>
2.4.5 <i>Lubrificante Sólido em Ferramentas Texturizadas.....</i>	<i>32</i>
2.4.6 <i>Efeito de Corte Derivativo Ocasionado por Texturas</i>	<i>34</i>
2.4.7 <i>Efeito da textura na Força de Usinagem em peças de Ti6Al4V</i>	<i>35</i>
2.4.8 <i>Efeito da textura na Rugosidade em peças de Ti6Al4V.....</i>	<i>37</i>
2.4.9 <i>Efeito da textura na Vida da Ferramenta de corte em peças de Ti6Al4V.....</i>	<i>38</i>
2.4.10 <i>Efeito da textura na formação de Cavacos em peças de Ti6Al4V.....</i>	<i>40</i>
2.5 Laser de Femtossegundos.....	43
3 METODOLOGIA.....	47
3.1 Equipamentos e Insumos	48
3.2 Planejamento Geral.....	49
3.2.1 <i>Estágio A - Revisão bibliográfica</i>	<i>49</i>
3.2.2 <i>Estágio B - Planejamento experimental</i>	<i>50</i>
3.2.3 <i>Estágio C - Projeto da bancada experimental.....</i>	<i>54</i>
3.2.4 <i>Estágio D - Geração das Texturas.....</i>	<i>55</i>
3.2.5 <i>Estágio E - Análises das Texturas</i>	<i>55</i>
3.2.6 <i>Estágio F – Ensaios</i>	<i>55</i>
3.2.7 <i>Estágio G - Análises dos resultados</i>	<i>56</i>
3.2.8 <i>Estágio H - Finalização da redação da tese</i>	<i>56</i>
3.3 Ferramentas de Corte de Metal Duro e Suporte	57

3.4 Produção da Textura	58
3.5 Aplicação do Lubrificante Sólido nas Texturas	61
3.6 Experimentos.....	63
3.6.1 <i>Parâmetros de corte no Torneamento</i>	64
3.6.2 <i>Análise de Força</i>	65
3.6.3 <i>Análise da Rugosidade da Peça Usinada</i>	67
3.6.4 <i>Análise da Vida da Ferramenta de Corte</i>	68
3.6.5 <i>Análise Metalográfica e de Microdureza da peça e dos Cavacos.....</i>	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1 Etapa 1	74
4.1.1 <i>Planejamento da Etapa 1</i>	74
4.1.2 <i>Texturas Produzidas na Etapa 1</i>	76
4.1.3 <i>Resultados de Força da Etapa 1</i>	79
4.1.4 <i>Resultados de Rugosidade da Etapa 1</i>	82
4.1.5 <i>Resumo dos Resultados da Etapa 1</i>	85
4.1.6 <i>Preparação para a Etapa 2</i>	89
4.2 Etapa 2	97
4.2.1 <i>Planejamento da Etapa 2</i>	97
4.2.2 <i>Texturas Produzidas na Etapa 2</i>	102
4.2.3 <i>Resultados de Força da Etapa 2</i>	103
4.2.4 <i>Resultados de Rugosidade da Etapa 2</i>	107
4.2.5 <i>Resumo dos Resultados da Etapa 2</i>	111
4.2.6 <i>Preparação para a Etapa 3</i>	115
4.3 Etapa 3	118
4.3.1 <i>Planejamento da Etapa 3</i>	119
4.3.2 <i>Texturas Produzidas na Etapa 3</i>	122
4.3.3 <i>Resultados de Força da Etapa 3</i>	125
4.3.4 <i>Resultados de Rugosidade da Etapa 3</i>	128
4.3.5 <i>Resultados de Vida da Etapa 3</i>	132
4.3.6 <i>Resultados de Desgaste dos Testes de Vida da Etapa 3</i>	138
4.3.7 <i>Resultados de Microdureza e Metalografia da Etapa 3</i>	153
5 CONCLUSÕES	159
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	163

1 INTRODUÇÃO

A usinagem destaca-se como um dos processos de fabricação mais empregados na indústria manufatureira, motivo pelo qual ela recebe ampla atenção no meio científico, especialmente diante da necessidade permanente de aprimorar seu desempenho. Trata-se de um processo de remoção de material destinado à obtenção de formas e acabamentos por diferentes métodos, sendo o material retirado denominado cavaco (Trent e Wright, 2000). Nos processos convencionais, esse cavaco é gerado a partir do movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça usinada. Dessa forma, a análise dos fenômenos que se desenvolvem na região de contato entre cavaco e ferramenta é essencial para direcionar pesquisas e estratégias de otimização em usinagem.

De modo semelhante ao que ocorreu com os chamados quebra-cavacos em ferramentas de corte, atualmente consolidados e incorporados aos insertos pelos próprios fabricantes a partir de resultados de pesquisas, surge uma nova abordagem para a otimização do contato entre cavaco e ferramenta: a texturização da superfície das ferramentas de corte. A tendência é que esse recurso evolua até ser integrado ao processo produtivo dos fabricantes, passando a ser disponibilizado comercialmente como uma característica padrão das ferramentas.

Em um primeiro momento, a texturização de ferramentas de corte recebeu atenção limitada, sobretudo por envolver métodos de fabricação complexos e com baixa repetibilidade. Contudo, ao longo da última década, a difusão de técnicas mais precisas, como a texturização a laser, tornou esse tema significativamente mais atrativo para investigação científica. De acordo com Samad et al. (2012), o emprego de lasers de pulso ultracurto desponta como uma tendência promissora para a texturização de ferramentas de corte, em função da elevada repetibilidade do processo e da capacidade de gerar estruturas sem comprometer a integridade da superfície.

Nos últimos anos, diversos autores se dedicaram à compilação dos efeitos da texturização por meio de estudos de revisão, como os trabalhos de Sharma e Panday (2016), Arslan, A. et al. (2016) e Gajrani e Sankar (2017), sendo um mais recente e abrangente o de Machado et al. (2021). De modo geral, essas revisões apontam para uma convergência nas conclusões, embora ainda existam parâmetros cujos resultados apresentam divergências significativas entre diferentes pesquisas. Como exemplo, Dhage, Jayal e Sarkar (2019) observaram que ranhuras lineares apresentam melhor desempenho tribológico quando orientadas paralelamente à aresta de corte, enquanto Mishra, Ghosh e Aravindan (2019)

verificaram que essa mesma orientação pode elevar o atrito e prejudicar o processo de usinagem.

Uma possível explicação para tais discrepâncias reside nas diferenças entre os materiais analisados em cada estudo, visto que o primeiro investigou aço carbono, ao passo que o segundo utilizou a liga Ti6Al4V, materiais com propriedades mecânicas bastante distintas, especialmente em termos de dureza, resistência, condutividade térmica e densidade. Trabalhos de revisão, como o de Sharma et al. (2016), reuniram resultados sem considerar de forma sistemática o material usinado, priorizando as conclusões mais recorrentes. Como consequência, os efeitos da texturização em materiais como as ligas de titânio, amplamente empregadas na indústria ficam subestimados, pois, segundo Machado et al. (2021), essas ligas correspondem a 21% dos materiais investigados entre 2017 e 2021 em estudos sobre ferramentas texturizadas. Trata-se, portanto, de um número expressivo de investigações.

Até o momento, diversas configurações de textura demonstraram potencial para melhorar o desempenho no corte de materiais. Entretanto, em grande parte das situações, observa-se um desgaste acelerado da ferramenta, que remove rapidamente as estruturas texturizadas ao longo de curtos percursos de usinagem. Assim, a aplicação prática dessas texturas torna-se viável apenas quando sua profundidade é suficiente para compensar o desgaste durante o uso da ferramenta de corte, ou quando as condições de usinagem resultam em taxas de desgaste não relevantes, permitindo que a textura permaneça ativa durante a vida da ferramenta.

Uma condição representativa para este segundo cenário é a usinagem da liga Ti6Al4V, amplamente empregada em setores como o aeroespacial, biomédico e automotivo devido à sua elevada resistência específica, baixa densidade, estabilidade térmica e excelente resistência à corrosão (Donachie, 2000; Welsch, Boyer e Collings, 1994). Entretanto, essas mesmas características contribuem para sua baixa usinabilidade, marcada por altas temperaturas na zona de corte, tendência à adesão e desgaste acelerado da ferramenta (Machado et al., 2021). Nesse contexto, o uso de ferramentas texturizadas tem sido investigado como estratégia para modificar as condições tribológicas na interface cavaco-ferramenta, especialmente nas etapas iniciais e intermediárias do processo, quando as texturas ainda permanecem ativas. Além disso, os estudos envolvendo texturização de ferramentas aplicadas à usinagem de ligas de titânio, que, embora representem 21% dos materiais investigados, conforme a literatura (Machado et al., 2021), indicam que essa aplicação precisa ser melhor entendida.

Essa lacuna na literatura motiva investigações que avaliem os efeitos da texturização correlacionando-os às propriedades dos materiais envolvidos. A usinagem do Ti6Al4V

apresenta desafios associados à sua baixa condutividade térmica, elevada reatividade química, alta resistência mecânica e formação do cavaco segmentado, fatores que intensificam o atrito e a geração de calor na interface cavaco-ferramenta. Assim, pesquisas que busquem compreender o papel das texturas na modificação das condições tribológicas tornam-se relevantes para aplicações industriais, uma vez que o titânio é amplamente utilizado em componentes críticos dos setores aeroespacial, biomédico e de energia.

Diversos autores que investigaram a usinagem de ligas de titânio relatam que a texturização de ferramentas pode reduzir o atrito e a adesão, contribuindo para a estabilidade do processo e para o controle das temperaturas de corte, sem comprometer imediatamente a integridade da ferramenta. No entanto, tais estudos geralmente não se concentram na determinação de uma geometria ótima de textura. Para operações convencionais, como torneamento e fresamento, ainda há escassez de referências que estabeleçam parâmetros geométricos ideais. Alguns trabalhos indicam correlações entre dimensões das texturas e melhorias no desempenho da usinagem, porém o ponto ótimo desses parâmetros permanece pouco explorado. Além disso, parâmetros como a direção das texturas podem apresentar comportamentos distintos dependendo do material usinado, conforme discutido por Vasumathy e Meena (2017).

O presente trabalho propõe a avaliação de parâmetros geométricos de texturas, incluindo direção, profundidade, largura, espaçamento e geometria, considerando sua forte dependência da combinação material da peça e material da ferramenta. No caso do Ti6Al4V, a formação de cavacos segmentados, aliada à tendência à adesão e à formação de aresta postiça de corte, modifica significativamente o contato na interface cavaco-ferramenta. Diferentemente de materiais mais dúcteis, o comportamento do cavaco do titânio pode favorecer a atuação das texturas na redução da área efetiva de contato e na retenção de detritos ou fluidos lubrificadorantes. Dessa forma, ao empregar texturas com dimensões adequadas e variar os parâmetros dentro de faixas compatíveis com a usinagem da liga, busca-se identificar a configuração mais eficiente e comparar seu desempenho com o de uma ferramenta sem texturização.

Esta pesquisa pode contribuir para a avaliação da viabilidade da fabricação de ferramentas de corte previamente texturizadas voltadas à usinagem do Ti6Al4V, com potencial para aumentar a eficiência dos processos, reduzindo consumo de energia, tempo de usinagem e custos operacionais. Adicionalmente, são abordados temas complementares à texturização, como a associação entre texturas e lubrificantes sólidos, ainda pouco explorada em ferramentas convencionais, mas que tem apresentado resultados promissores em determinadas condições de

corte (Arslan, T. et al., 2016). Essa abordagem também se mostra relevante do ponto de vista ambiental e ocupacional, ao minimizar os impactos associados ao uso de fluidos de corte convencionais.

Dessa forma, o presente trabalho busca reunir e analisar de maneira integrada conclusões que se encontram dispersas na literatura sobre texturização aplicada à usinagem de ligas de titânio. Serão avaliadas diferentes combinações de dimensões e geometrias de texturas, considerando não apenas seus efeitos isolados no processo de corte, mas também sua relação com as propriedades do material usinado e com as condições tribológicas características do Ti6Al4V.

1.1 Objetivo Geral

Investigar o efeito de diferentes geometrias de texturas produzidas na superfície de saída por laser de femtossegundos em ferramentas de metal duro sem revestimento no torneamento de Ti6Al4V com fluido aplicado em abundância. Serão consideradas as forças de usinagem, a rugosidade da peça, o desgaste e a vida das ferramentas de corte.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Estudar o efeito das dimensões das texturas (larguras e profundidades), a distância das texturas em relação à aresta principal de corte e a direção das texturas na forma de canais paralelos, considerando os esforços (3 componentes da força de usinagem: corte, avanço e passiva), e a rugosidade da peça.
- 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, determinadas no item anterior) e do avanço.
- Determinar a dimensões da textura e o avanço ótimos, utilizando técnicas de MSR (metodologia de superfícies de respostas), considerando os modelos do item anterior (de força e rugosidade).

- Utilizar as dimensões de textura e avanço ótimas obtidas no item anterior para investigar seu efeito em diferentes condições de corte e sob a aplicação de MoS₂, comparando com ferramentas não texturizadas. Investigar, além da força de usinagem e da rugosidade Ra, a vida da ferramenta.
- Determinar os mecanismos de desgaste predominantes nas ferramentas utilizadas no item anterior.
- Caracterizar os cavacos gerados e a peça torneada (microdureza e metalografia).

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, abordando a contextualização da usinagem de ligas de titânio com ferramentas texturizadas, a motivação da pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos, bem como a organização da tese.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, contemplando os fundamentos da usinagem e do torneamento, as características da liga Ti6Al4V e das ferramentas de metal duro WC-Co, além dos principais conceitos relacionados à texturização de ferramentas de corte. Também são discutidos os efeitos das texturas sobre forças de usinagem, rugosidade, desgaste, adesão, vida da ferramenta e formação de cavacos, com ênfase em aplicações envolvendo ligas de titânio. Por fim, são apresentados os fundamentos da texturização por laser de femtossegundos.

O Capítulo 3 descreve a metodologia empregada no desenvolvimento da pesquisa. Nesse capítulo são apresentados os equipamentos e materiais utilizados, o planejamento experimental, os parâmetros de usinagem, os procedimentos de fabricação das texturas e os métodos de análise utilizados para avaliação das forças de corte, rugosidade, desgaste, vida da ferramenta, microdureza e metalografia.

O Capítulo 4 apresenta os resultados experimentais e suas respectivas discussões. Os resultados são organizados conforme as etapas desenvolvidas ao longo da pesquisa, permitindo a análise da evolução do estudo desde a avaliação inicial das geometrias texturizadas até a definição das condições otimizadas de usinagem e sua validação experimental. A pesquisa foi dividida em 3 etapas sequenciais, cada uma definida a partir dos resultados da anterior. A

metodologia de cada etapa depende dos resultados da etapa anterior. Portanto, a metodologia aplicada a cada nova etapa é também parte dos resultados da etapa anterior.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados da pesquisa, destacando as principais contribuições do trabalho e as observações mais relevantes acerca da aplicação de texturas em ferramentas de corte para usinagem da liga Ti6Al4V. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema.

1.4 Declaração de Uso de Inteligência Artificial

Ferramentas baseadas em Inteligência Artificial (IA) foram utilizadas como apoio durante a elaboração desta tese, exclusivamente para auxílio na revisão gramatical, ortográfica, semântica e melhoria da clareza textual. O uso dessas ferramentas teve caráter unicamente assistivo, não sendo empregado para geração de resultados científicos, interpretação de dados experimentais ou elaboração das conclusões da pesquisa.

Todo o conteúdo técnico-científico, bem como as análises, os resultados e as interpretações apresentados, é de responsabilidade exclusiva do autor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos da usinagem e do torneamento, as características da liga Ti6Al4V e das ferramentas de metal duro WC-Co. Em seguida, aborda a texturização de ferramentas de corte, contemplando a geometria e as dimensões das texturas, seus efeitos tribológicos, a redução da adesão, o uso de lubrificantes sólidos e suas influências sobre as forças, a rugosidade, a vida da ferramenta e a formação dos cavacos. Por fim, são apresentados os fundamentos do laser de femtossegundos empregado na produção das microtexturas.

2.1 Usinagem e Torneamento

A usinagem configura-se como um dos processos mais empregados na manufatura, sendo caracterizada pela remoção de material na forma de cavaco. Nesse processo, uma ferramenta promove o cisalhamento do material por meio do movimento relativo entre ferramenta e peça. Quanto à geometria da ferramenta de corte, esta pode ser classificada como definida ou indefinida (Normung, 2003). Entre os processos que utilizam ferramentas de geometria definida destacam-se o torneamento, a furação e o fresamento.

No torneamento, um dos métodos mais difundidos, o modelo de corte usual envolve a rotação da peça, cuja combinação entre diâmetro e rotação determina a velocidade de corte, enquanto a ferramenta se desloca longitudinalmente, caracterizando o avanço, além de penetrar radialmente no material, definindo a profundidade de corte. Esse processo é particularmente adequado para a produção de peças com geometria de sólidos de revolução (Trent e Wright, 2000).

Na indústria metalmeccânica, o torneamento se destaca entre as operações mais empregadas, em razão de sua elevada versatilidade e aplicações (Klocke e König, 2007). No contexto de pesquisas sobre usinagem com ferramentas texturizadas, esse processo também se destaca pela simplicidade na obtenção de insumos, pela facilidade operacional e pelas possibilidades de instrumentação, correspondendo a cerca de 70% dos estudos recentes na área (Machado et al., 2021). Diante dessa representatividade, fabricantes de máquinas e ferramentas têm direcionado esforços crescentes para o seu aprimoramento. O tipo de torneamento mais investigado é o cilíndrico externo, embora existam outras variações, como o torneamento cilíndrico interno, cônico, de faceamento, de perfilamento, de sangramento e o recartilhamento.

A eficiência do processo de corte está diretamente relacionada a múltiplos parâmetros operacionais. Técnicas que reduzem as forças de corte, a temperatura durante a usinagem e o

desgaste das ferramentas possibilitam operar com velocidades mais elevadas, resultando em menor custo e maior produtividade. No caso das ferramentas de corte, o desempenho pode ser aprimorado por meio do endurecimento do material base, da aplicação de camadas de revestimento ou da texturização da superfície de contato (Kawasegi et al., 2009).

Apesar de a texturização ser uma técnica estudada desde o final da década de 1960, seu estudo permaneceu limitado até recentemente. Somente na última década a área ganhou maior visibilidade, impulsionada pelo desenvolvimento de métodos mais eficientes para a criação de texturas, tornando sua aplicação mais acessível e viável para pesquisas e indústrias.

Machado et al. (2015) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) destacam que o corte de metais ocorre por meio do cisalhamento do material ao longo do denominado plano de cisalhamento primário (Figura 1). O ângulo de cisalhamento, definido entre a direção do corte e esse plano, apresenta relação inversa com a resistência ao corte, o que explica a formação de cavacos com espessura ligeiramente superior à espessura teórica do corte.

Na interface entre cavaco e ferramenta, denominada zona de cisalhamento secundária (Figura 1 item A), observa-se inicialmente uma região de aderência próxima à aresta de corte (Figura 1 item B), seguida por uma área de deslizamento (Figura 1 item C). É nesse contato que se desenvolvem os fenômenos fundamentais da usinagem convencional, e a análise das propriedades e parâmetros dos elementos envolvidos fornece a base para os estudos relacionados ao processo de corte.

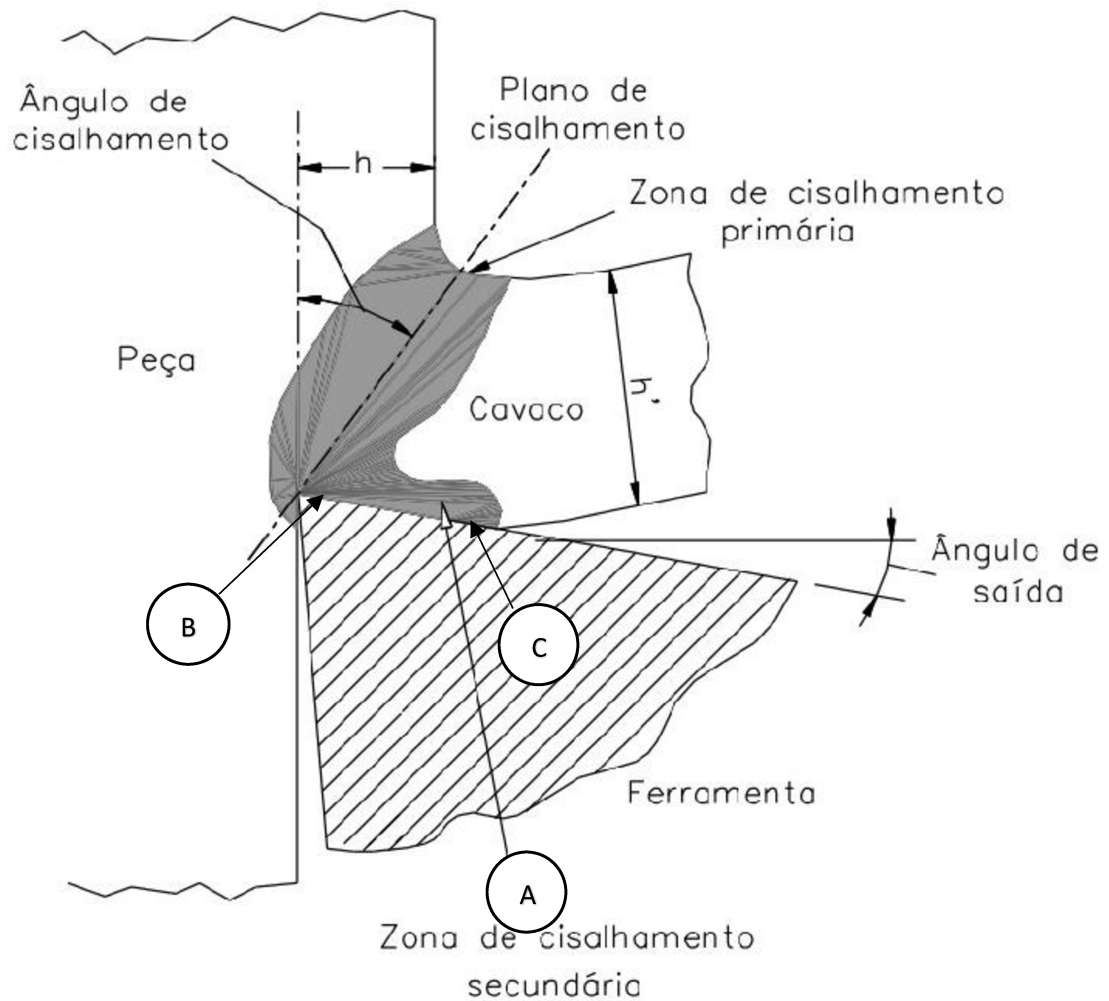


Figura 1 – Ilustração da formação do cavaco. Fonte: Machado et al. (2015).

O corte do material pode ser compreendido como um conjunto de etapas que conduzem à formação do cavaco, segundo Machado et al. (2015). Inicialmente, a ferramenta penetra no material, provocando primeiro uma deformação elástica e, em seguida, plástica, até que o material se rompe, dando origem a uma trinca na aresta principal da ferramenta. Essa trinca pode se estender ao longo do plano de cisalhamento primário, dependendo das propriedades mecânicas do material. A continuidade dos cavacos gerados na usinagem depende diretamente das condições de corte e das propriedades da liga, que influenciam a propagação das trincas iniciais. Após essa etapa, os fragmentos formados deslizam, e o cavaco é removido ao longo das regiões de aderência e deslizamento da ferramenta, onde se desenvolvem forças elevadas e temperaturas significativas devido à ruptura de ligações adesivas, caracterizando o cisalhamento secundário e os fenômenos centrais da usinagem convencional.

Além dos efeitos sobre forças de corte, temperatura, desgaste da ferramenta e integridade superficial da peça, compreender a formação do cavaco é fundamental para seu

controle. Cavacos de tamanho ou formato inadequado podem representar riscos ao operador, danificar equipamentos, comprometer a qualidade da superfície usinada, provocar paradas na máquina e gerar dificuldades no manuseio, armazenamento e descarte. No caso do Ti6Al4V, a tendência à formação de cavacos curtos, segmentados e muito duros, aliada à baixa condutividade térmica do material, dificulta a dissipação de calor, aumentando o risco de aderência à ferramenta, sobreaquecimento localizado e desgaste prematuro, exigindo atenção especial à geometria da ferramenta e às condições de corte (Machado et al., 2021).

2.2 Titânio e sua liga Ti6Al4V

O titânio é um elemento metálico de transição, de símbolo químico “Ti” e número atômico 22. Em sua forma pura, apresenta aspecto prateado e brilho metálico quando polido. Sua densidade, de aproximadamente $4,5 \text{ g/cm}^3$, situa-se entre as densidades típicas do alumínio e do aço. As ligas de titânio combinam densidade significativamente inferior à dos aços com resistência mecânica que pode se aproximar daquela apresentada por determinados aços, resultando em elevada resistência mecânica específica e ampla aplicação em engenharia (Donachie, 2000; Welsch, Boyer e Collings, 1994). Devido à combinação de baixa densidade, elevada resistência específica, resistência à corrosão e biocompatibilidade, a liga Ti6Al4V encontra aplicação em diferentes áreas da engenharia. Conforme ilustrado na Figura 2, sua utilização abrange os setores biomédico, aeroespacial, marítimo, automotivo, químico, arquitetônico e de geração de energia.

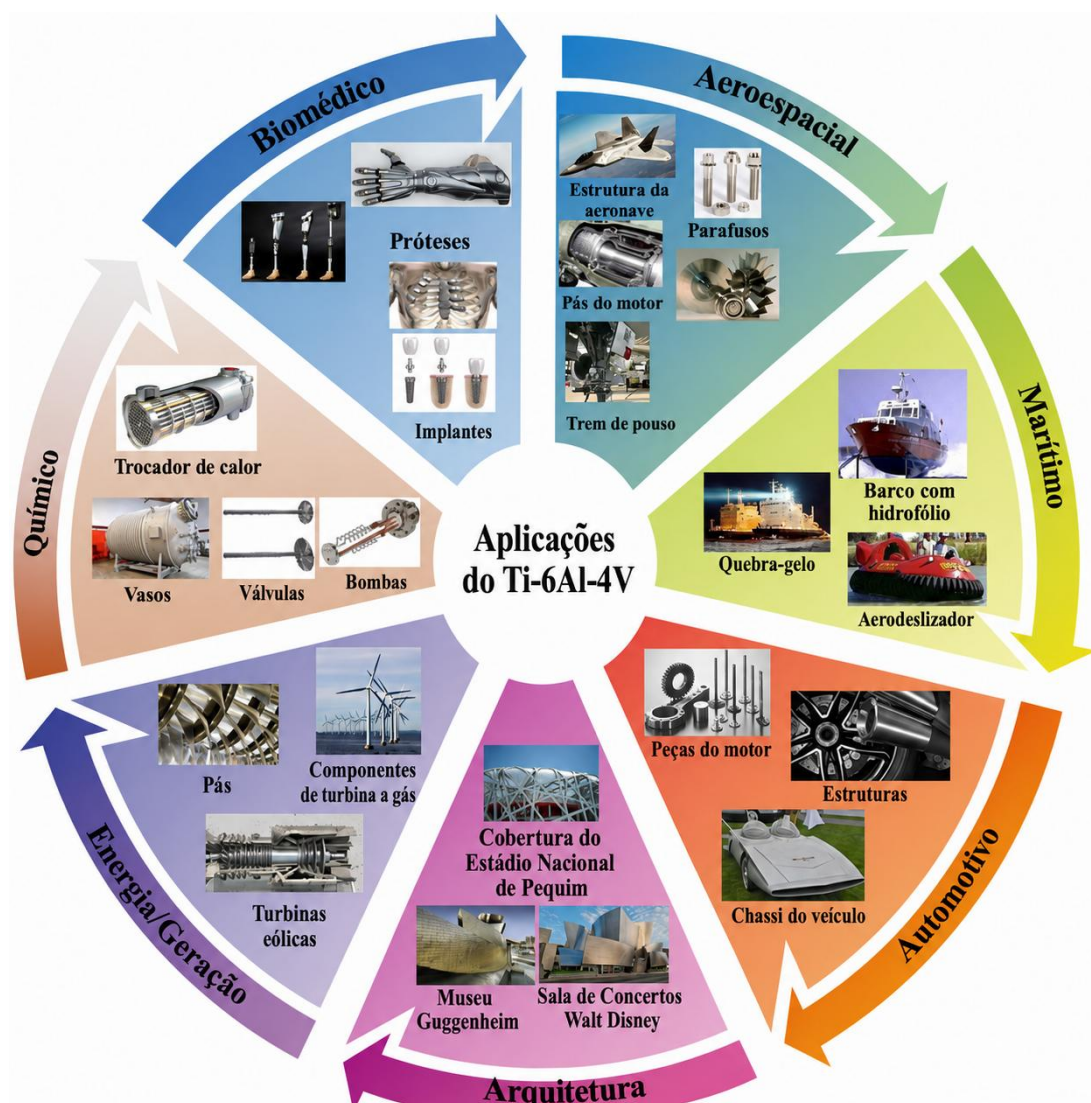


Figura 2 – Principais aplicações da liga de titânio Ti-6Al-4V nos setores biomédico, aeroespacial, marítimo, automotivo, arquitetônico, químico e de geração de energia. Fonte: adaptado de Khan et al. (2025).

Uma das propriedades mais marcantes do titânio é sua elevada resistência à corrosão, decorrente da formação espontânea de uma camada fina, aderente e estável de óxido, constituída predominantemente por dióxido de titânio (TiO_2). Essa camada passiva protege a superfície em diversos ambientes, incluindo água do mar e numerosos meios oxidantes. Entretanto, seu comportamento em soluções ácidas depende de fatores como concentração, temperatura e presença de espécies oxidantes. A elevada resistência à corrosão justifica o emprego do titânio em equipamentos da indústria química, sistemas de dessalinização e aplicações marítimas (Donachie, 2000).

Do ponto de vista físico, o titânio puro apresenta ponto de fusão de aproximadamente 1.668 °C e condutividade térmica relativamente baixa, em torno de 22 W/(m·K). Na liga Ti-6Al-4V, a condutividade térmica é ainda menor, aproximadamente 6,7 W/(m·K) à temperatura ambiente, dificultando a dissipação do calor gerado durante a usinagem e favorecendo sua concentração nas proximidades da interface cavaco-ferramenta. Para comparação, a condutividade térmica do aço carbono 1020 é de aproximadamente 52 W/(m·K). Além disso, embora o titânio seja dúctil à temperatura ambiente, sua elevada reatividade com o oxigênio e o nitrogênio em temperaturas elevadas exige cuidados durante seu processamento e fabricação (Donachie, 2000; Welsch, Boyer e Collings, 1994).

O titânio e suas ligas também apresentam elevada biocompatibilidade, caracterizada por uma resposta biológica favorável e pela capacidade de integração com os tecidos em diversas aplicações médicas. Essa característica, associada à resistência à corrosão e às propriedades mecânicas, favorece seu emprego em implantes ortopédicos e dentários, próteses e instrumentos cirúrgicos. Por essas razões, o titânio é considerado um material estratégico nos setores aeroespacial, naval, químico e biomédico, nos quais são valorizadas características como baixa densidade, resistência mecânica, durabilidade e resistência à corrosão (Geetha et al., 2009).

Embora os graus comercialmente puros de titânio apresentem excelente resistência à corrosão e baixa densidade, sua resistência mecânica é inferior à das principais ligas de titânio, o que limita sua utilização em aplicações estruturais submetidas a carregamentos elevados. Para superar essa limitação, foram desenvolvidas ligas como a Ti-6Al-4V, constituída nominalmente por aproximadamente 6% de alumínio e 4% de vanádio, em massa, sendo o restante composto predominantemente por titânio. O alumínio atua como estabilizador da fase α e promove endurecimento por solução sólida, enquanto o vanádio estabiliza a fase β e contribui para a obtenção da microestrutura bifásica $\alpha + \beta$ e para a resposta da liga aos tratamentos térmicos. Essa combinação proporciona um equilíbrio favorável entre resistência mecânica, ductilidade, tenacidade e baixa densidade. Consequentemente, a Ti-6Al-4V é amplamente empregada em componentes estruturais e de motores aeronáuticos, implantes ortopédicos, próteses, instrumentos cirúrgicos e outras aplicações que demandam materiais leves, resistentes e duráveis (Lütjering e Williams, 2007; Welsch, Boyer e Collings, 1994; Geetha et al., 2009).

Entretanto, apesar de suas vantagens mecânicas, o Ti6Al4V apresenta desafios significativos em processos de usinagem devido à sua baixa condutividade térmica ($\sim 6,7$ W/mK), que concentra o calor gerado na zona de corte na ferramenta e na região de cisalhamento, dificultando a dissipação eficiente e elevando as temperaturas na interface cavaco-ferramenta. Essa característica, combinada à forte reatividade química da liga com o

material de ferramenta de corte, à manutenção da resistência mecânica em altas temperaturas e ao baixo módulo de elasticidade, contribui para altas forças de corte, instabilidades, desgaste prematuro das arestas e formação de adesões indesejadas (Kosaraju e Anne, 2013; Bammidi et al., 2024).

Além disso, o Ti6Al4V tende a formar cavacos segmentados, um efeito associado à instabilidade térmica, ao acúmulo de calor na zona de cisalhamento e à própria ductilidade limitada da liga sob esforço de corte (Tayisepi et al., 2023). Esses cavacos dificultam a evacuação eficiente, aumentam o atrito na interface cavaco-ferramenta e podem comprometer a integridade superficial da peça, acelerando o desgaste da ferramenta se não forem controlados adequadamente. Por conta dessas características, operações a seco são restritas, sendo comum o uso de lubrificação e refrigeração eficazes para auxiliar na dissipação de calor, reduzir adesões e prolongar a vida útil das ferramentas de corte.

Para melhor compreensão das propriedades do Ti6Al4V que influenciam diretamente o comportamento durante a usinagem, a Tabela 1 apresenta suas principais características físicas e mecânicas quantitativas.

Tabela 1 – Principais propriedades do Ti6Al4V relevantes para a usinagem

Propriedade	Valor típico para Ti6Al4V	Valor típico para Aço Carbono 1020	Unidade
Densidade	4,43	7,85	g/cm ³
Módulo de elasticidade	115	200	GPa
Módulo de cisalhamento	44	77	GPa
Condutividade térmica	7	52	W/(m·K)
Faixa de fusão	1600-1670	1425-1540	°C
Dureza	355	140	HV

Fonte: Langhe Industry Co., Ltd., 2025.

2.3 Ferramentas de corte de Metal Duro (WC-Co)

Na usinagem convencional, a remoção de material ocorre pelo contato da ferramenta de corte com a peça, aproveitando o movimento relativo entre ambos. Dessa forma, a ferramenta está constantemente sujeita a desgaste, o que torna imprescindível que sua dureza seja superior à do material trabalhado.

Segundo Machado et al. (2015), as ferramentas de corte devem atender a requisitos específicos para garantir desempenho adequado:

- Manter-se mais dura que o material usinado, mesmo sob condições de elevada temperatura;
- Apresentar resistência significativa a diferentes mecanismos de desgaste e processos de destruição, incluindo desgaste abrasivo, desgaste adesivo, deformação plástica por compressão e cisalhamento, além de suportar choques térmicos e impactos;
- Permanecer quimicamente estável, sem reagir com os materiais envolvidos no corte.

As ferramentas de metal duro WC–Co são amplamente utilizadas na usinagem devido à combinação entre elevada dureza, resistência ao desgaste e tenacidade. Esses materiais são constituídos por partículas de carboneto de tungstênio (WC), que formam a fase dura e resistente ao desgaste, incorporadas em uma fase ligante metálica de cobalto (Co), relativamente dúctil e responsável por aumentar a tenacidade e a resistência à fratura do material. Especificamente, a classe comercial H13A utilizada neste trabalho consiste em um metal duro não revestido composto aproximadamente por 94% de WC e 6% de Co em massa, com tamanho médio dos grãos de WC de aproximadamente 1 μm (Upadhyaya, 2001; Olander e Heinrichs, 2021).

Os insertos de metal duro WC-Co, por exemplo os modelos da classe H13A, combinam propriedades mecânicas e térmicas que os tornam extremamente eficientes para operações de torneamento, fresamento e furação. A composição do material, formada por carboneto de tungstênio (WC) como fase dura e cobalto (Co) como ligante, garante uma combinação equilibrada de dureza elevada, resistência ao desgaste e tenacidade, permitindo que as arestas de corte permaneçam afiadas mesmo ao usinar materiais abrasivos ou de alta resistência, como ligas de titânio ou aços inoxidáveis.

A geometria das pastilhas, incluindo o raio de ponta e o ângulo de saída, é cuidadosamente projetada para facilitar a formação e evacuação dos cavacos, reduzir forças de corte e minimizar vibrações, mantendo a integridade da peça e prolongando a vida útil da ferramenta. A estabilidade térmica e a baixa dilatação do material permitem suportar cargas elevadas e ciclos térmicos repetidos sem deformação, garantindo precisão dimensional mesmo em operações severas (Sumitomo, 2026).

Entre as vantagens do torneamento com insertos de metal duro, destacam-se a possibilidade de operar em condições exigentes com alta produtividade, a manutenção de tolerâncias apertadas, menor frequência de troca de ferramenta e flexibilidade em diferentes

profundidades de corte, avanços e velocidades. Além disso, a elevada dureza e o alto ponto de fusão permitem que os insertos possam ser texturizados ou tratados com lasers de femtossegundos sem comprometer a microestrutura, abrindo caminho para otimizações da interface ferramenta-cavaco e redução do atrito (Arslan, A et al., 2016).

Por outro lado, algumas limitações precisam ser consideradas. A fragilidade do compósito WC-Co pode levar à ocorrência de fraturas em cortes interrompidos profundos ou sujeitos a vibração excessiva. O desgaste por adesão e a formação de rebarbas são um risco ao usinar ligas de alta reatividade, como o Ti6Al4V, exigindo estratégias de lubrificação eficientes. Além disso, o custo mais elevado em relação às ferramentas de aço rápido e os cuidados necessários na fixação aumentam a complexidade operacional.

Assim, os insertos H13A de metal duro oferecem um equilíbrio entre durabilidade, produtividade e precisão, sendo especialmente indicados para usinagem de materiais difíceis de usinar e aplicações industriais severas, desde que sejam respeitadas suas limitações mecânicas e térmicas.

A Tabela 2 apresenta as principais propriedades quantitativas dos insertos de metal duro WC-Co relevantes para torneamento. Esses dados fornecem uma visão detalhada da capacidade dos insertos de suportar cargas elevadas, esforços tangenciais, altas temperaturas e desgaste, elementos críticos para a eficiência e a durabilidade durante o corte.

Tabela 2 – Propriedades dos insertos WC-Co H13A relevantes para torneamento

Propriedade	Valor típico	Unidade
Composição	90%WC e 10%Co	% em peso
Densidade	15	g/cm ³
Dureza (Vickers)	1630	HV
Módulo de Elasticidade	580-690	GPa
Módulo de Cisalhamento	230-280	GPa
Condutividade térmica	20-100	W/(m·K)
Faixa de fusão	2780-2900	°C
Coeficiente de dilatação térmica	5,5	10 ⁻⁶ /°C
Resistência à compressão	3000-6000	MPa

Fonte: adaptado de HNCarbide, 2026.

2.4 Texturas em Ferramentas de Corte

Com o avanço da tecnologia, os fabricantes de ferramentas de corte vêm investindo em pesquisa e desenvolvimento para manter sua competitividade no mercado, buscando constantemente aprimorar seus produtos. Nesse contexto, surgem novas tecnologias que, por sua vez, apresentam desafios adicionais para os pesquisadores da área de usinagem. O principal objetivo dessas inovações é melhorar as condições do tribossistema na interface cavaco-ferramenta, reduzindo atrito, calor gerado e desgaste, diminuindo o consumo de energia e aumentando a qualidade superficial das peças usinadas.

Nos últimos anos, cresceu o número de estudos que demonstram a possibilidade de modificar o contato entre cavaco e ferramenta por meio da texturização da superfície de saída. Essas texturas são aplicadas especificamente na região de contato com o material, apresentando dimensões reduzidas, escala microscópica e geometria bem definida.

A texturização de uma superfície consiste na criação de padrões topográficos capazes de modificar sua interação em comparação com uma superfície lisa, de modo que esses padrões tragam benefícios ao processo no qual a superfície está envolvida. Quando aplicada às ferramentas de corte, a presença de texturas pode influenciar o comportamento tribológico na interface cavaco-ferramenta, alterando as forças que atuam nesse contato (Lima, 2005).

Com a popularização das técnicas de engenharia de superfícies, a texturização de ferramentas de corte passou a receber maior atenção na área de usinagem. As técnicas empregadas para gerar essas texturas são semelhantes às utilizadas em outros sistemas mecânicos, como próteses médicas, rolamentos e cilindros de pistão (Da Silva e Costa, 2017), incluindo métodos como FIB - *Focused Ion Beam* (feixe de íons focalizado), EDM - *Electrical Discharge Machining* (usinagem por descarga elétrica ou eletroerosão) e, principalmente, laser. Contudo, diferentemente desses outros sistemas, o tribossistema presente na usinagem está submetido a pressões de contato muito mais elevadas, podendo chegar a 3,5 GPa (Trent e Wright, 2000), tornando a aplicação da texturização em ferramentas de corte um desafio significativamente mais complexo.

As elevadas pressões de contato na interface cavaco-ferramenta são uma característica da usinagem, uma vez que o corte do material só se inicia quando a pressão aplicada é suficiente para provocar o cisalhamento, formando o cavaco. Essas condições limitam a eficácia de algumas técnicas tradicionais de lubrificação, tornando a texturização uma alternativa viável para modificar o contato cavaco-ferramenta, com o objetivo de aprimorar o desempenho do corte e otimizar o processo de usinagem.

2.4.1 Geometria das Texturas

Desde os primeiros estudos sobre texturização de ferramentas de corte, os pesquisadores vêm explorando diferentes geometrias de padrões para avaliar seus efeitos no desempenho da usinagem. Alguns trabalhos, como os de Mishra, Ghosh e Aravindan (2019), Arulkirubakaran et al. (2019) e Orra e Choudhury (2018), focam na criação de padrões específicos, enquanto outros, como Pan et al. (2018), Kang et al. (2018-A), Gajrani, Sankar e Dixit (2018-A) e Wei et al. (2017), investigam combinações de diferentes geometrias. Apesar dessa variedade, os padrões mais comuns são os canais lineares (*grooves*), que correspondem a 39% das texturas estudadas entre 2017 e 2021, e os *dimples*, representando 25% (Machado et al., 2021). A Figura 3 apresenta essas geometrias mais recorrentes.

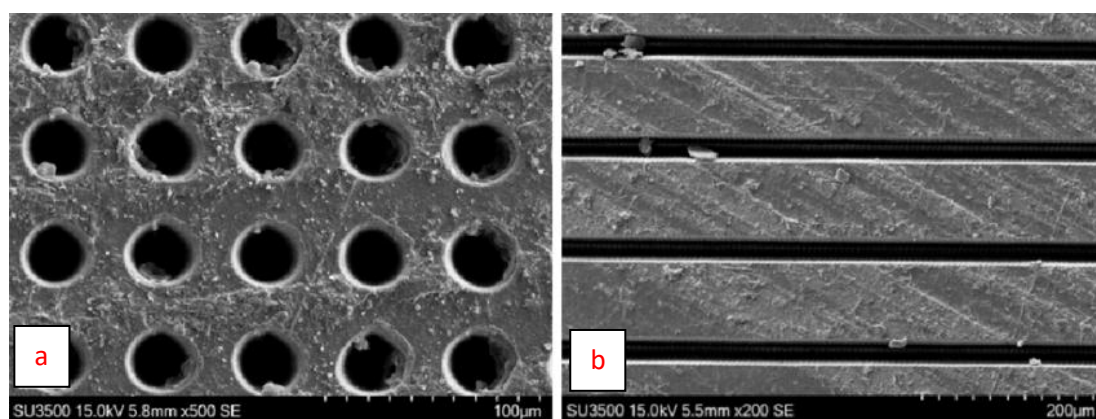


Figura 3 – (a) Textura *dimples* (cavidades), e (b) Textura *grooves* (ranhuras). Fonte: Zhang et al. (2019).

As texturas do tipo *dimple* podem apresentar diferentes formatos de cavidades, como demonstrado por Xing et al. (2018-A), que investigaram *dimples* circulares, quadrados e triangulares (Figura 4). Entretanto, a grande maioria dos estudos concentra-se em *dimples* circulares, variando apenas suas dimensões, como profundidade, raio e demais parâmetros geométricos.

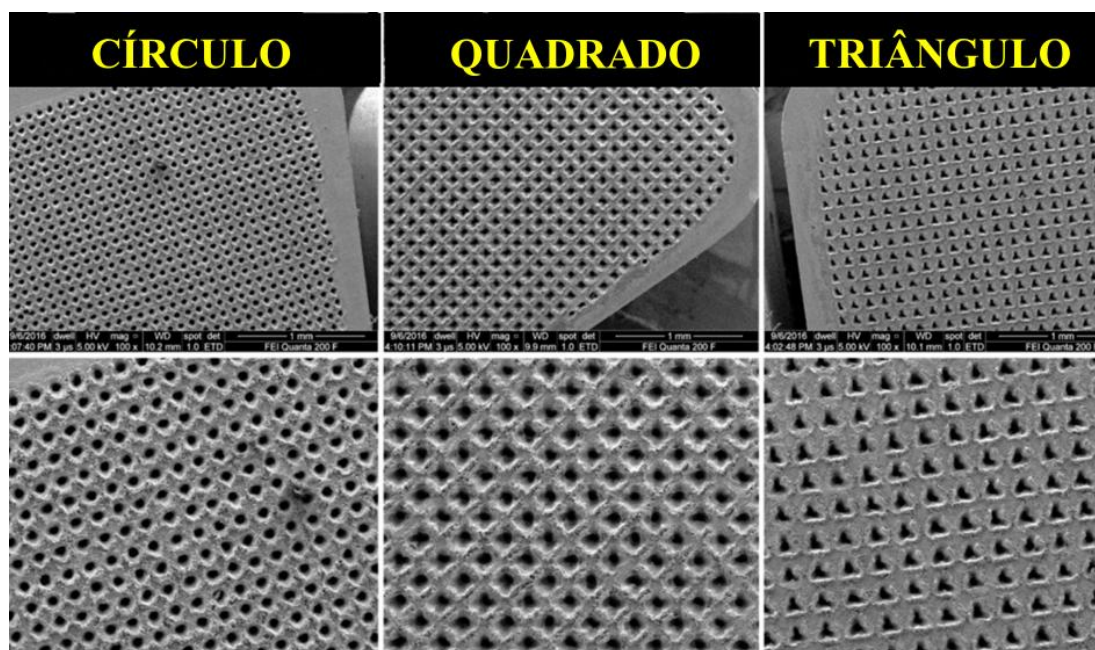


Figura 4 – Diferentes tipos de *dimples*. Fonte: adaptado de Xing et al. (2018-A).

As texturas do tipo canais (*grooves*) consistem em sulcos cuja orientação pode variar em relação à direção da aresta de corte, frequentemente alinhados paralela ou perpendicularmente ao fluxo de cavacos. Alguns estudos exploram inclinações específicas em relação a essa direção, ou ainda formatos alternativos, como *grooves* em padrões variados, conforme ilustrado na Figura 5. Os efeitos dessas geometrias sobre a usinagem não podem ser avaliados apenas pela forma do *groove*. Para compreender seu impacto, é necessário considerar também dimensões da textura, posição na ferramenta de corte, presença de lubrificação e outros fatores associados ao processo.

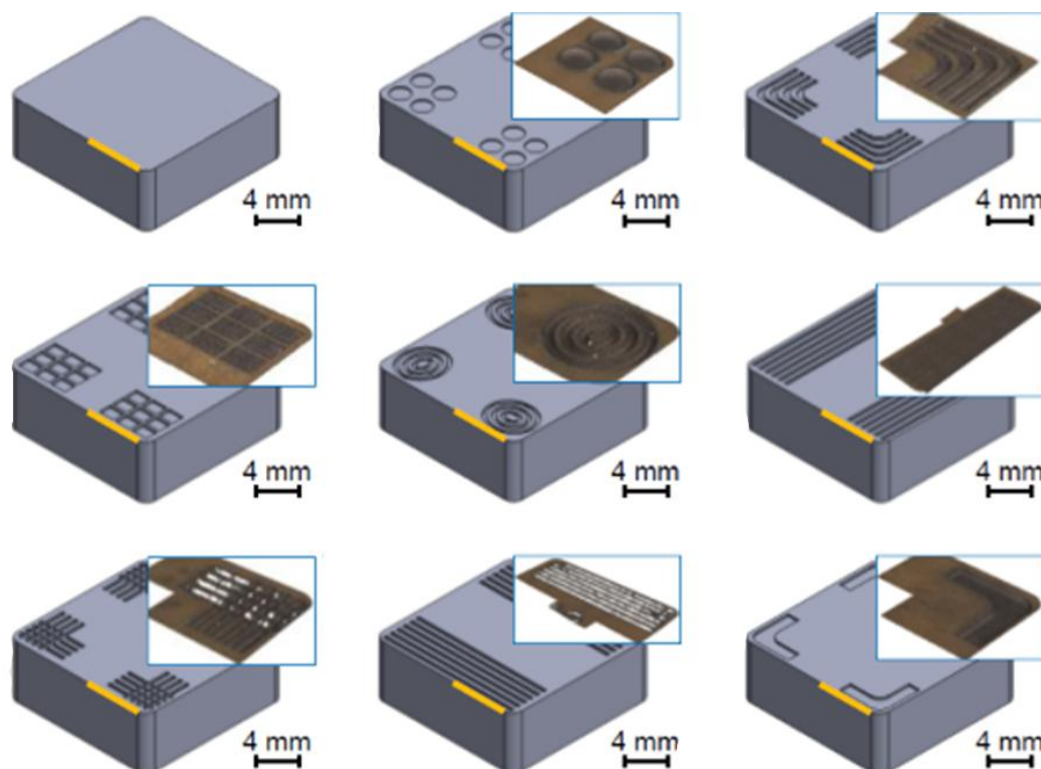


Figura 5 – Diferentes texturas na superfície de saída em ferramentas de corte (modelos em CAD e imagens ópticas 3D reais). Fonte: adaptado de Wu et al. (2017).

2.4.2 Dimensões das Texturas e Seus Efeitos na Usinagem

Quando se trata de texturas em ferramentas de corte, os parâmetros dimensionais (como profundidade, largura, espaçamento, forma e direção) exercem influência significativa, e cada um deles pode alterar os resultados de maneira expressiva. Além disso, os efeitos desses parâmetros podem variar drasticamente dependendo da combinação adotada, do tipo de ferramenta e do material usinado, de modo que os resultados obtidos muitas vezes não abrangem uma ampla gama de condições, tornando necessária a experimentação para casos específicos.

No que diz respeito à formação do cavaco, Feng et al. (2019) observaram que, em texturas do tipo *groove* (canais ou sulcos), a largura do *groove* e a velocidade de corte são os fatores mais influentes, sendo que *grooves* mais estreitos combinados com altas velocidades de corte reduzem o impacto sobre o cavaco. Quanto às forças de usinagem, Mishra, Ghosh e Aravindan (2018-A) destacam que a densidade de texturas na ferramenta é o parâmetro mais relevante. Embora aumentar a largura e/ou diminuir o espaçamento entre *grooves* tenha o efeito de redução do contato cavaco-ferramenta, também pode elevar a aderência e o fluxo de cavacos

sobre as texturas, enquanto o aumento da profundidade dos *grooves* mostrou-se pouco eficaz (Patel, Shah e Ozel, 2019). Essa observação está alinhada com Mishra, Ghosh e Aravindan (2018-A), que indicaram que a profundidade não apresenta efeito significativo em cortes a seco.

De acordo com Patel et al. (2020), os parâmetros relacionados à dimensão e posição dos *grooves* não apresentaram tendência clara em afetar as forças de corte, sendo que profundidades excessivas podem, inclusive, elevar tensões locais. Por outro lado, para temperatura e desgaste, a profundidade e a distância da aresta de corte mostraram correlação direta: quanto maiores, maiores a temperatura e o desgaste da ferramenta. Em estudos com texturas do tipo *dimple*, Fang e Obikawa (2017) constataram que as dimensões das texturas exercem influência ainda mais relevante sobre a temperatura do que nas texturas do tipo *groove*.

Nas texturas do tipo *dimple*, o diâmetro das cavidades se mostra como o parâmetro de maior influência, conforme observado por Durairaj et al. (2018), que tornearam alumínio AA 6061. Ao detalhar a relevância dos demais parâmetros, Yang, Yu e He (2019-A), em estudo focado na rugosidade da peça (de Ti6Al4V), estabeleceram a seguinte ordem de influência: “diâmetro > espaçamento > profundidade > distância da aresta de corte”. Já no trabalho de Yang et al. (2020), também tornearam Ti6Al4V, ao analisarem o efeito sobre as forças de usinagem, encontraram a sequência “diâmetro > distância da aresta de corte > profundidade > espaçamento”, enquanto para o desgaste da ferramenta a ordem foi “distância da aresta de corte > espaçamento > profundidade > diâmetro”. Além disso, Vignesh et al. (2020) definiram valores específicos para esses parâmetros dimensionais com o objetivo de otimizar o desempenho das texturas *dimples* para torneamento de Aço SAE/AISI 4340. Já para condições de alta velocidade de corte, os efeitos benéficos das *dimples* só se manifestam quando estão presentes em elevada concentração, conforme demonstrado por Stoeterau, Janssen e Mallmann (2017), num estudo que avaliou o torneamento de três materiais diferentes: liga de alumínio 2024, aço carbono SAE/AISI 1045 e ferro fundido nodular GGG40.

Diversos estudos apresentam valores específicos para orientar a definição dos melhores parâmetros na fabricação de texturas. Por exemplo, Sharma e Panday (2017) tornearam aço SAE/AISI 4340 endurecido e Fang e Obikawa (2017) tornearam Inconel 718, ambos os trabalhos abordando texturas do tipo *dimples*, enquanto os trabalhos de Liu et al. (2018-A) e Wu et al. (2017) tornearam cerâmica verde de Al₂O₃ (óxido de alumínio/alumina) para investigar *grooves*. Neste último estudo, foi constatado que a proporção ideal de um *groove* corresponde a uma largura de aproximadamente 43% da profundidade, de modo a minimizar as forças de corte e facilitar a formação do cavaco.

A profundidade das texturas assume papel crucial em cortes realizados com lubrificação. Fang e Obikawa (2017) verificaram que *dimples* de 10 e 20 μm de profundidade induzem no fluxo de escoamento do cavaco, um efeito de redemoinhos incompletos e correntes parasitas, respectivamente, influenciando tanto a distribuição da energia cinética turbulenta quanto o padrão de escoamento na folga do flanco. Em investigações com lubrificação mínima (MQL), Pratap e Patra (2020) relacionaram as dimensões das texturas ao tamanho das gotas do fluido lubrificante, ressaltando a importância da molhabilidade na interação com a superfície texturizada para a retificação de vidro óptico BK7. Esse efeito da molhabilidade é ainda mais evidente no estudo de Hao et al. (2018), que demonstraram como a presença de lubrificante amplifica a influência das texturas sobre o processo de torneamento de Ti6Al4V.

2.4.3 Características Tribológicas Resultantes das Texturas

Um dos benefícios atribuídos às texturas é a capacidade de aprisionar resíduos de desgaste, como aqueles gerados por abrasão ou adesão. Nos *grooves*, esse efeito é mais evidente quando os sulcos são orientados perpendicularmente ao fluxo de cavaco (Su et al., 2018). Sivaiah e Bodicherla (2020) expandiram a análise para *grooves* paralelos, perpendiculares e inclinados a 45° em relação à aresta de corte, concluindo que os *grooves* inclinados geram menos detritos metálicos na superfície usinada e menor acúmulo de APC na ferramenta.

Quando os *grooves* possuem padrões não lineares, as texturas ajudam a evitar o acúmulo de resíduos dentro das cavidades, conforme demonstrado por Kim et al. (2016) e Zhang et al. (2020), que ainda verificaram que, em algumas situações, isso contribui para a redução do atrito. No caso das *dimples*, o aprisionamento de resíduos está fortemente relacionado ao tamanho das cavidades, efeito evidenciado em estudos como Sugihara e Enomoto (2017-A), Song et al. (2017) e Niketh e Samuel (2017). Para nanotexturas, entretanto, esse aprisionamento é insignificante devido às dimensões extremamente reduzidas.

Nos estudos sobre *grooves* lineares, que representam cerca de 40% de todas as texturas analisadas entre 2017 e 2021 (Machado et al., 2021), a orientação da textura se mostra um fator determinante, geralmente definida como paralela ou perpendicular à aresta de corte, em alguns casos, considerando-se a direção do fluxo de cavacos. Sob o ponto de vista tribológico, a orientação perpendicular ao fluxo de cavacos tende a oferecer melhor desempenho. Dhage, Jayal e Sarkar (2019) observaram que *grooves* paralelos ao fluxo podem entupir com o cavaco, aumentando o contato, enquanto *grooves* perpendiculares reduzem a área de contato.

Essa conclusão é reforçada por Chen et al. (2019), Arulkirubakaran et al. (2019), Kumar e Patel (2018) e Grguraš e Pusavec (2019), que destacam que, apesar de alterações na curvatura do cavaco, a diminuição da área de contato, a menor adesão e aprisionamento de resíduos apresentam efeito predominante (Da Silva et al., 2013). Em contrapartida, Su et al. (2018) apontam que *grooves* alinhados ao fluxo do cavaco podem retardar a expansão da área de adesão.

Quando se analisam ângulos variados, Vasumathy e Meena (2017) indicaram que as orientações tradicionais (paralela ou perpendicular à aresta de corte) são mais eficientes, enquanto *grooves* inclinados em ângulo agudo perdem eficiência e ângulos obtusos podem até aumentar as forças de corte. Para cortes de acabamento, entretanto, a direção dos *grooves* lineares mostrou-se irrelevante (Kang et al., 2018-A).

Na usinagem por furação, o efeito do aprisionamento de resíduos pode ser particularmente significativo. Niketh e Samuel (2018) aplicaram texturas do tipo *dimple* (diâmetro de 90 μm e profundidade de 60 μm) e *grooves* (largura de 50 μm e profundidade de 40 μm) em brocas, e seus experimentos mostraram uma redução considerável tanto na força de avanço quanto no torque. A presença das texturas diminuiu o atrito de deslizamento na interface cavaco-ferramenta, e um mapeamento da superfície das brocas revelou redução de até 44% na adesão em comparação com brocas lisas. A Figura 6 ilustra como a texturização auxilia o corte. Estudos anteriores, como Niketh e Samuel (2017), também indicaram que esse efeito pode reduzir os esforços de furação em até 12%.

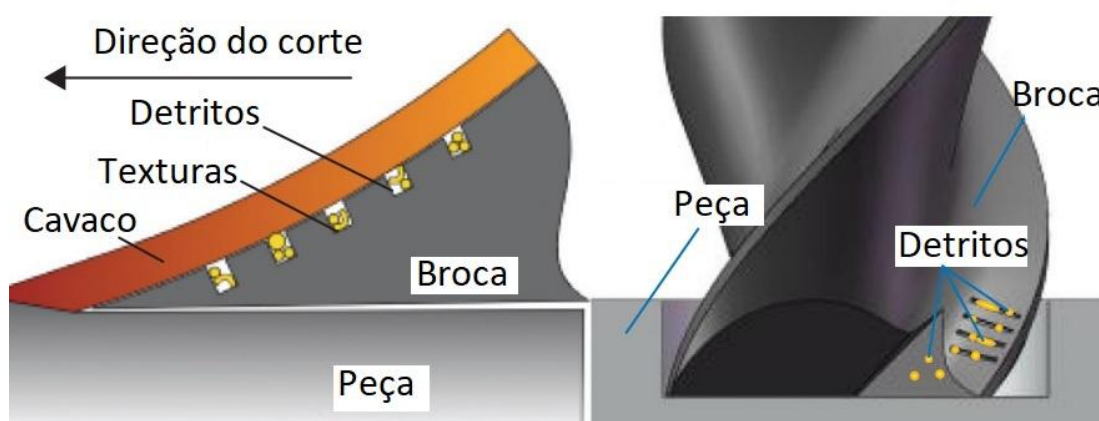


Figura 6 – Esquematização da atuação das texturas em brocas. Fonte: adaptado de Zhang et al. (2019).

Até o momento, não foram encontrados, na literatura consultada, estudos que abordem métodos para remover os detritos aprisionados em texturas *dimples*. Já no caso das texturas *grooves*, a facilidade de remoção dos resíduos está relacionada às dimensões dos sulcos. O tipo de material dos detritos também influencia o processo: partículas pequenas e sólidas podem ser eliminadas por métodos baseados em vibração, enquanto partículas maiores ou mais dúcteis exigem técnicas químicas, jateamento ou mesmo intervenção manual. Em algumas situações, os métodos utilizados para remover detritos gerados na usinagem podem coincidir com aqueles empregados para limpar resíduos originados na fabricação das texturas na ferramenta de corte.

2.4.4 Redução do Efeito de Adesão na Ferramenta Texturizada

Um dos benefícios mais frequentemente relatados do uso de ferramentas texturizadas é a redução da adesão, efeito observado em praticamente todos os estudos sobre texturização. Segundo Machado et al. (2021), cerca de um terço dos artigos publicados entre 2017 e 2021 destacaram de forma significativa essa vantagem. Pesquisas como Zhou et al. (2019), Lian, Chen e Mu (2019) e Ghosh e Pacella (2020) mostraram que a texturização pode reduzir a adesão em até 60%. Mesmo texturas em nanoescala demonstram esse efeito, conforme descrito por Liu et al. (2018-B) e Zhang et al. (2017). Apenas Alagan et al. (2019) relataram que a textura não apresentou efeito relevante sobre a adesão, em um caso específico entre várias modalidades testadas. Já Liu et al. (2019) e Singh et al. (2020) observaram que a influência da textura na adesão é desprezível apenas em experimentos realizados em baixas velocidades de corte.

No estudo de Lian, Chen e Mu (2019), foi constatado que *grooves* ajudam a aprisionar o material aderido à ferramenta: enquanto ferramentas lisas apresentaram adesão de até 200 μm a partir da aresta de corte, nas ferramentas texturizadas essa distância não ultrapassou 88 μm . A Figura 7, de Su et al. (2018), ilustra claramente esse efeito.

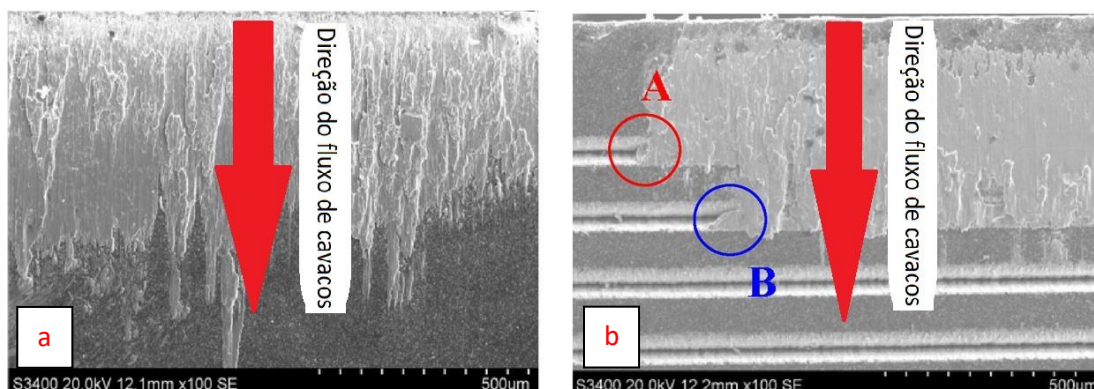


Figura 7 – Em (a) uma imagem de uma ferramenta sem textura, e em (b) uma exemplificação de como texturas perpendiculares ao fluxo de cavacos podem ajudar a evitar o efeito de adesão (círculos A e B na Figura (b)). Fonte: adaptado de Su et al. (2018).

Alguns estudos indicam que, entre as diferentes geometrias de texturas, as *dimples* são as mais eficazes na redução da adesão, conforme relatado por Sawant, Jain e Palani (2018). Avançando na análise, Xing et al. (2016) e Ahmed et al. (2020) verificaram que *dimples* quadradas apresentam desempenho ainda melhor nesse aspecto. No que diz respeito aos parâmetros dimensionais das *dimples*, o diâmetro se mostra o mais determinante, segundo Durairaj et al. (2018).

Niketh e Samuel (2018), trabalhando com *dimples*, evidenciaram o efeito do aprisionamento de partículas como mecanismo de redução da adesão (Figura 8). No entanto, observa-se que a saturação das partículas dentro da textura limita sua eficácia, criando regiões totalmente preenchidas onde o contato entre cavaco e superfície de mesma natureza ainda ocorre. A partir das dimensões das *dimples*, é possível estimar a duração de atuação da textura ao longo do processo de corte.

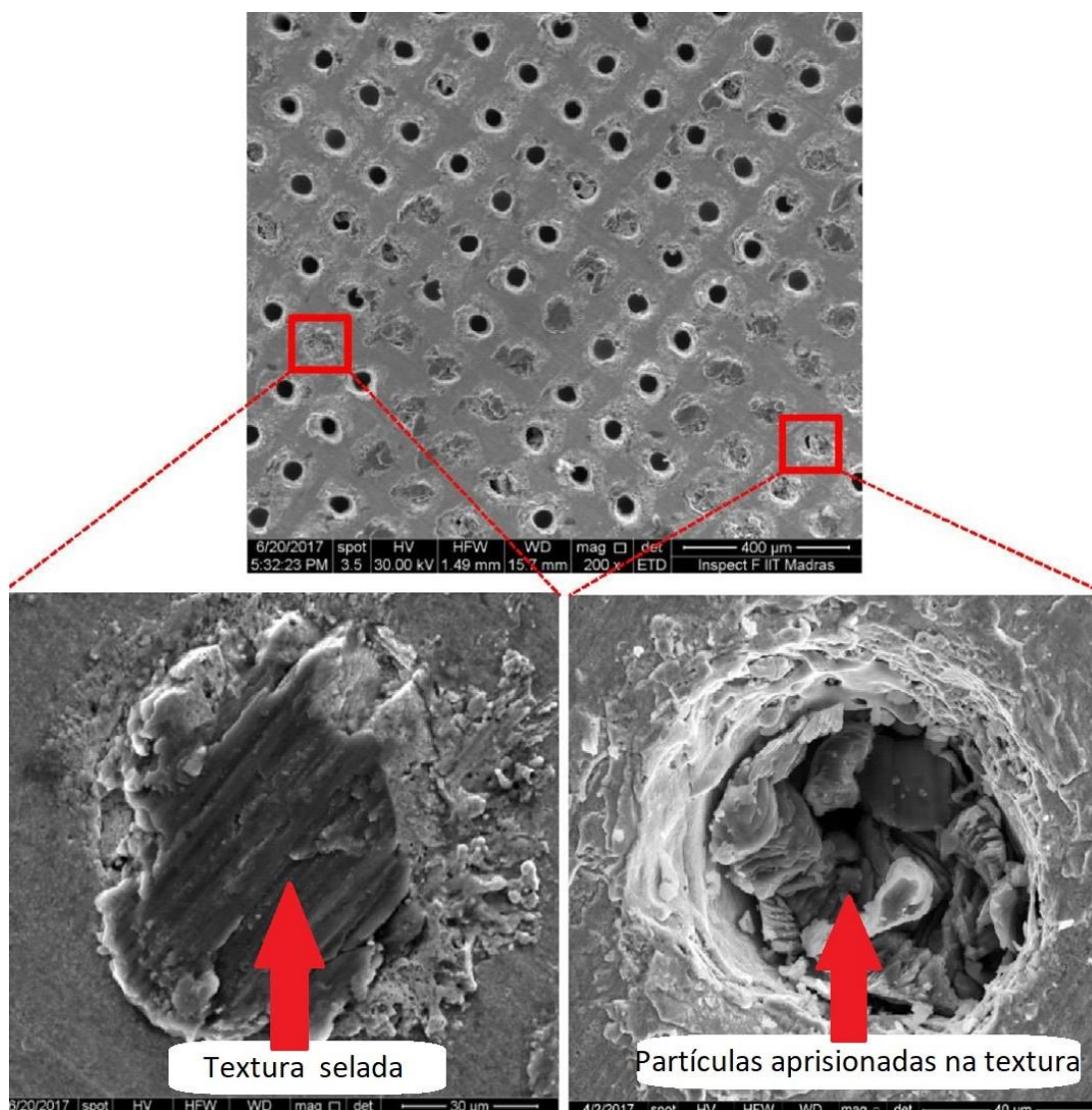


Figura 8 – Atuação de texturas *dimples* na redução da adesão até a saturação de cada textura. Fonte: adaptado de Niketh e Samuel (2018).

De forma geral, os estudos indicam que a principal razão pela qual as texturas reduzem a adesão é a diminuição da área de contato entre a ferramenta e o cavaco. Esse efeito antiadesão é analisado de forma detalhada por Su et al. (2018). Outros mecanismos que contribuem para a redução da adesão incluem a melhora no acesso do lubrificante às regiões de contato (Ge et al., 2019), como também demonstrado por Arulkirubakaran et al. (2019), Pang, Liu e Liu (2019), Dinesh, Senthilkumar e Asokan (2017) e Pratap e Patra (2020). Adicionalmente, o intertravamento mecânico entre cavaco e superfície texturizada tem sido apontado como outro fator relevante para a diminuição da adesão, conforme estudado por Su et al. (2018), Mishra, Ghosh e Aravindan (2018-B) e Kang et al. (2018-A).

2.4.5 Lubrificante Sólido em Ferramentas Texturizadas

O uso de lubrificantes é uma abordagem eficiente para diminuir os esforços de cisalhamento durante a usinagem, contribuindo para o aprimoramento do processo de corte. Quando aplicados na forma de jorro, os fluidos atuam não apenas na lubrificação, mas também na remoção do calor gerado durante a operação, desempenhando função refrigerante (Sukaylo et al., 2004). O controle da temperatura é crucial, pois níveis elevados aceleram mecanismos e processos de desgaste como adesão, difusão, dissolução e deformação plástica, comprometendo a durabilidade da ferramenta; assim, mesmo pequenas reduções térmicas podem prolongar significativamente sua vida útil (Ferraresi, 1970).

Apesar desses benefícios, a aplicação de fluidos de corte enfrenta críticas devido a impactos na saúde dos operadores e no meio ambiente. Esses fluidos apresentam problemas em todas as dimensões do “tripé da sustentabilidade” (TBL – *Triple Bottom Line*) (King et al., 2001): socialmente, afetam a saúde humana; ambientalmente, são tóxicos e exigem descarte controlado; e economicamente, geram custos adicionais com tratamento, descontaminação de cavacos e medidas de segurança. Estima-se que esses custos podem representar até 20% das despesas totais de um processo de usinagem (King et al., 2001).

Diante dos problemas associados ao uso de fluidos lubrificantes convencionais, muitas indústrias têm buscado reduzir ou até eliminar sua aplicação, explorando soluções alternativas. Entre essas abordagens estão o uso de fluidos com composição química menos prejudicial, técnicas de Mínima Quantidade de Lubrificante (minimum quantity lubrication, MQL), lubrificantes sólidos e métodos especiais, como a refrigeração interna da ferramenta de corte como visto nos trabalhos de Rao e Krishna, (2008), França et al. (2023) e Peixoto et al. (2025).

Nesse contexto, o corte a seco tem ganhado destaque como uma tendência promissora na evolução dos processos de usinagem. Ao eliminar o uso de fluidos de corte, é possível reduzir custos de produção e minimizar impactos ambientais. Segundo Diniz e De Oliveira (2004), os benefícios do corte a seco incluem menor poluição atmosférica e hídrica, ausência de resíduos de óleo nos cavacos (o que diminui custos de descarte e limpeza) e eliminação de riscos à saúde dos operadores. Os avanços recentes em ferramentas de corte vêm tornando essa prática cada vez mais viável, embora sua adoção ainda precise ser ampliada.

O corte a seco apresenta desafios, como aumento do coeficiente de atrito e da adesão entre ferramenta e peça, o que intensifica o desgaste da ferramenta e reduz sua vida útil (Sreejith e Ngoi, 2000; Reddy, Kapoor e Devor, 2000). Apesar de ainda não haver consenso sobre a

eficiência relativa das diferentes alternativas, estratégias que minimizam ou eliminam a necessidade de fluidos de corte já mostram resultados promissores na prática industrial.

Uma alternativa promissora ao uso de fluidos de corte convencionais é a aplicação de lubrificantes sólidos, sendo os mais comuns o grafite, o dissulfeto de molibdênio (MoS_2), o fluoreto de cálcio (CaF_2) e o ácido bórico (H_3BO_3) (Cotton e Wilkinson, 1988). Esses lubrificantes podem ser aplicados diretamente sobre a superfície da peça antes do corte ou incorporados como revestimento na ferramenta (Klocke, 2011). Seu efeito decorre da formação de microestruturas lamelares com baixa adesão interna, permitindo que essas lamelas cisalhem facilmente e funcionem como um filme lubrificante eficiente, com coeficiente de atrito reduzido.

Embora superem os lubrificantes fluidos em termos de sustentabilidade ambiental, impacto social e custo, os sólidos apresentam limitações, como menor durabilidade na região de corte e capacidade limitada de reduzir a temperatura durante o corte. Para mitigar a questão da durabilidade, o uso de ferramentas texturizadas surge como uma estratégia complementar, auxiliando na retenção e eficácia do lubrificante sólido (Ze et al., 2012).

Nesse contexto, as texturas das ferramentas não apenas armazenam resíduos, mas também funcionam como reservatórios de lubrificante sólido. O mecanismo descrito por Feng et al. (2017) mostra que inicialmente a textura é preenchida pelo lubrificante sólido; durante o corte, os resíduos de cavacos mais pesados se aprisionam na textura, forçando o transbordamento do lubrificante, que forma uma camada contínua sobre a superfície da ferramenta. Mesmo em texturas em escala nano, que não dependem desse efeito de transbordamento, a presença da textura melhora a retenção e o desempenho do lubrificante, atuando então como uma barreira contra o efeito de deslizamento (Lian et al., 2018; Zhang et al., 2017).

Para texturas do tipo *grooves*, as lineares se mostram mais eficazes no uso de lubrificantes sólidos do que as padronizadas (Orra e Choudhury, 2018). No caso das *dimples*, a eficiência está associada à formação de um filme lubrificante descontínuo, capaz de reduzir o atrito e a temperatura do corte (Song et al., 2017). Estudos indicam ainda que geometrias híbridas, combinando *grooves* e *dimples*, proporcionam os melhores resultados (Sun et al., 2016). Gajrani, Kishor e Sankar (2018-A), ao realizar torneamento em aço AISI 1040 com *grooves* preenchidos com MoS_2 , observaram redução média da rugosidade entre 2% e 11% e diminuição da temperatura média entre 4% e 20%, em comparação com as texturas sem lubrificante.

2.4.6 Efeito de Corte Derivativo Ocasionado por Texturas

O corte derivativo acontece quando o cavaco já formado é novamente cortado dentro de uma textura presente na ferramenta (Figura 9). Esse fenômeno foi relatado em vários estudos, como Lian, Chen e Mu (2019), Mishra, Ghosh e Aravindan (2018-B), Liu et al. (2018-B) e Liu et al. (2017), sendo que Duan et al. (2017, 2018) e Dinesh, Senthilkumar e Asokan (2017) exploraram mais detalhadamente suas consequências. Durante o corte derivativo, pequenas bifurcações podem se formar no fluxo de cavaco ao remover material na base das texturas, gerando concentrações significativas de calor (Duan et al., 2019). Isso eleva as forças de corte e aumenta o desgaste da ferramenta, comprometendo o desempenho de ferramentas texturizadas. Texturas *grooves* perpendiculares ao fluxo de cavacos são mais propensas a apresentar esse efeito, pois a borda da textura age como uma sub-aresta de corte, embora outras geometrias também possam causar o fenômeno.

O corte derivativo também está relacionado a danos na ferramenta, como trincas na região texturizada. Estudos de Lian, Chen e Mu (2019) indicam que, em texturas rasas de 10 μm , esse efeito surge apenas em altas velocidades. Liu et al. (2018-A) mostraram que o desgaste do revestimento pode criar degraus nanométricos próximos às texturas, desencadeando o corte derivativo. Por outro lado, Liu et al. (2017) observaram que, no torneamento de cerâmica de alumina (Al_2O_3) de alta pureza na fase α -alumina, o fenômeno pode reduzir o contato do cavaco com o flanco da ferramenta, diminuindo o desgaste nessa área.

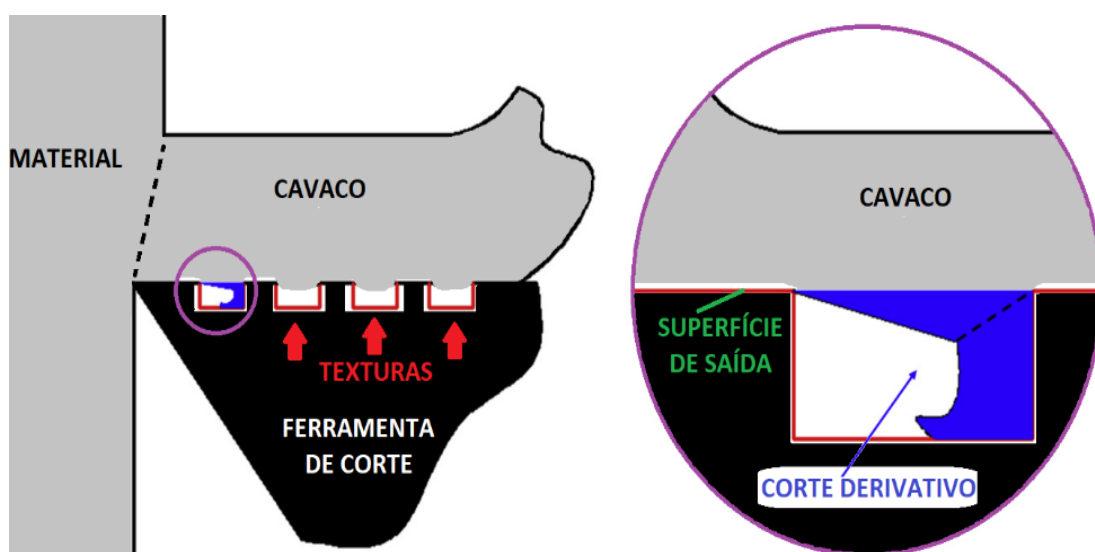


Figura 9 – Esquematização do corte derivativo. Fonte: adaptado de Duan et al. (2019).

2.4.7 Efeito da textura na Força de Usinagem em peças de Ti6Al4V

A análise das forças de usinagem no corte da liga Ti6Al4V revela-se essencial para compreender o desempenho das ferramentas texturizadas. Diversos estudos têm investigado como a implementação de texturas, como *grooves* e *dimples*, influencia as forças de corte, o coeficiente de atrito e a estabilidade do processo. Tais trabalhos permitem avaliar de que forma as texturas podem reduzir os esforços necessários para o cisalhamento do material, melhorar a eficiência do corte e mitigar a ocorrência de fenômenos indesejáveis, como adesão excessiva e desgaste localizado da ferramenta.

No estudo de Mishra et al. (2018-B), foram realizadas simulações por elementos finitos 3D e testes experimentais para investigar o efeito de ferramentas texturizadas. As texturas foram produzidas na superfície de saída de uma ferramenta de carboneto de tungstênio (WC/Co) utilizando laser pulsado de nanosegundos. Foram confeccionados quatro tipos diferentes de *dimples*, com geometrias circular, quadrada, triangular e elíptica. O torneamento a seco foi realizado em Ti6Al4V, com velocidade de corte de 80 m/min, avanço de 0,1 mm/rev e profundidade de corte de 1 mm. O trabalho comparou ferramentas texturizadas com ferramentas sem textura e foi verificado que a texturização promoveu redução das forças de corte, embora esse efeito tenha sido relativamente limitado na usinagem a seco da liga Ti6Al4V. A densidade de textura foi apontada como o parâmetro mais influente no comportamento das forças, sendo a condição com 38,5% de área texturizada a que apresentou os menores valores de força de corte. Entre as diferentes geometrias avaliadas, as texturas circulares e elípticas resultaram nas menores forças, enquanto as triangulares apresentaram pior desempenho em algumas condições e as quadradas tiveram efeito pouco significativo. O artigo conclui que o efeito da geometria da textura existe, porém é menos relevante do que a densidade de textura na redução das forças de usinagem.

Hao et al. (2018) estudaram o desempenho de ferramentas de diamante policristalino texturizadas com propriedades de molhabilidade oleofílica e oleofóbica. As texturas foram realizadas na superfície de saída por laser de fibra pulsado, sendo os *grooves* oleofílicos e as micro/nanoestruturas oleofóbicas. O teste de torneamento da liga Ti6Al4V foi realizado com lubrificação MQL, utilizando emulsão, velocidade de corte entre 30-120 m/min, avanço de 0,16 mm/rev e profundidade de corte de 0,2 mm. As ferramentas texturizadas apresentaram redução das forças de corte e do coeficiente médio de atrito, com diminuição respectivamente de 11,5% e 10,9% a 90 m/min, em comparação com ferramentas não texturizadas. O desgaste e a aderência da ferramenta também foram reduzidos.

Su et al. (2017) investigaram o desempenho de ferramentas de diamante policristalino (PCD) texturizadas com microcanais paralelos à aresta principal de corte no torneamento a seco da liga Ti6Al4V. Os microcanais foram fabricados na superfície de saída por laser de fibra ótica, e a usinagem foi realizada com velocidade de corte de 16 a 125 m/min, avanço de 0,19 mm/rev e profundidade de corte de 2 mm. As ferramentas texturizadas apresentaram menor força de avanço, menor força de corte principal, menor coeficiente médio de atrito e comprimento de contato reduzido em relação às ferramentas não texturizadas. O menor atrito na interface cavaco-ferramenta foi atribuído à redução do comprimento real de contato, à presença dos microcanais que dificultam a adesão e crescimento do cavaco (cavaco tende a permanecer segmentado invés de contínuo), e à formação de uma camada protetora de TiC.

No estudo de Mishra et al. (2020), foram avaliadas ferramentas texturizadas a laser em ambientes MQL e nano-MQL na usinagem da liga Ti6Al4V. A texturização combinada com lubrificação mínima proporcionou reduções significativas nas forças de corte. As gotas de MQL e nMQL foram dispersas de forma controlada na zona de impacto (vazão de 150 ml/h e pressão de 6 bar), maximizando a lubrificação. A força de corte principal foi reduzida em até 16,8% e a força de avanço em até 28,6% para avanços de 0,1–0,2 mm/rev. Além disso, houve redução no coeficiente de atrito aparente, no comprimento de contato aderente e na área de contato, demonstrando a eficácia da texturização.

Arulkirubakaran et al. (2018) estudaram ferramentas de carboneto de tungstênio com microcanais paralelos, perpendiculares e cruzados na superfície de saída, produzidos por W-EDM, no torneamento da liga Ti6Al4V. Uma mistura de MoS₂ com óleo SAE 40 (80:20) foi utilizada como lubrificante semissólido. As velocidades de corte variaram entre 60-120 m/min, com avanço de 0,1 mm/rev e profundidade de corte de 0,5 mm. As texturas reduziram significativamente as forças de corte, com diminuição do consumo de energia em 20%. A força principal foi reduzida em até 30% com sulcos perpendiculares, devido à menor área de contato, lubrificação aprimorada e ausência de formação de rebarbas aderidas.

No trabalho de Li et al. (2017), foram fabricadas três texturas em ferramentas de carboneto de tungstênio não revestidas: *groove* paralelo à aresta de corte principal, *groove* perpendicular e *dimple*, usando laser de femtossegundos na superfície de saída. Simulações por Método dos Elementos Finitos (FEM) e torneamento a seco de Ti6Al4V foram realizados com velocidade de corte de 50 m/min, avanço de 0,3 mm/rev e profundidade de corte de 2 mm. O *groove* paralelo apresentou melhor desempenho na redução das forças de corte e melhoria das propriedades de atrito, devido à menor área de contato e imersão dos cavacos nos sulcos. As forças de corte simuladas apresentaram boa concordância com os testes experimentais, com

erro de aproximadamente 3%, demonstrando a utilidade do software FEM *Third Wave AdvantEdge* para otimização futura dos parâmetros de ferramentas texturizadas.

2.4.8 Efeito da textura na Rugosidade em peças de Ti6Al4V

A qualidade superficial das peças de Ti6Al4V é um indicador crítico da eficiência do processo de usinagem e do desempenho das ferramentas texturizadas. Estudos revisados enfocam como diferentes geometrias e orientações de texturas, incluindo *grooves* lineares, *grooves* perpendiculares e *dimples*, impactam a rugosidade da superfície. A investigação sobre essas estratégias permite compreender os mecanismos pelos quais as texturas controlam o contato ferramenta-peça, influenciam a formação de cavacos e contribuem para reduzir irregularidades superficiais, resultando em acabamentos mais uniformes e controlados.

Num estudo sobre fresamento a seco de Ti6Al4V, Yang et al. (2018) produziram texturas na superfície de saída de uma ferramenta *Dijet BNM-20 Ball-End Milling Cutter* utilizando laser de fibra ótica, com formato de *dimples* e variando dimensões como diâmetro, profundidade, espaçamento e distância da aresta de corte. Os parâmetros do fresamento foram: velocidade de corte 120 m/min, avanço 0,08 mm/dente e profundidade de corte de 0,4 mm. A ordem de influência dos parâmetros de textura sobre a rugosidade da superfície foi determinada como: diâmetro > espaçamento > profundidade > distância da aresta de corte.

Li et al. (2018) investigaram microtexturas do tipo *dimple* em fresas de topo (modelo BNML-200105SS20C), realizadas por *laser de fibra ótica* na superfície de saída. O fresamento a seco da liga Ti6Al4V foi conduzido com velocidade de corte 120 m/min, avanço 0,08 mm/dente e profundidade de corte de 0,5 mm. As microtexturas demonstraram reduzir o desgaste da ferramenta, a força de corte e a temperatura de corte, além de melhorar a qualidade superficial da peça usinada.

Niketh e Samuel (2017) realizaram microtexturas na forma de cavidades nos canais de saída do cavaco e na guia cilíndrica de brocas (modelo DTC 300) utilizando microusinagem a laser. Experimentos de furação a seco em Ti6Al4V foram conduzidos com velocidade de corte de 30 a 60 m/min, avanço de 0,04 a 0,07 mm/rev e diâmetro da broca de 10 mm. A redução do comprimento de contato e o aprisionamento de detritos de desgaste foram identificados como mecanismos que melhoram as propriedades tribológicas das superfícies texturizadas em condições de deslizamento a seco.

Em mais um trabalho de Niketh e Samuel (2018), os autores, dessa vez, estudaram diferentes condições de lubrificação para furação com brocas texturizadas: seco, jorro e MQL.

A condição úmida utilizou óleo emulsionável misturado com água destilada na proporção de 1:20. As microtexturas foram criadas por laser nos canais helicoidais e na guia cilíndrica da broca, em formato de *dimples* circulares. A furação foi realizada em Ti6Al4V com velocidade de corte de 60 m/min, avanço 0,07 mm/rev e diâmetro da broca de 10 mm. A análise microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura de Alta Resolução (HRSEM - *High-Resolution Scanning Electron Microscopy*) revelou menor formação de defeitos superficiais nos furos usinados com ferramentas texturizadas. Além disso, a formação de rebarbas na saída do furo foi minimizada nas condições úmidas e MQL devido à maior taxa de dissipação de calor.

Singh et al. (2020) observou que a texturização das ferramentas melhorou o comportamento tribológico e o desempenho de usinabilidade. A redução do contato dos cavacos com a face de ataque da ferramenta contribuiu para aumento significativo da vida útil. As principais características do desgaste da ferramenta, no torneamento da liga Ti6Al4V, incluíram desgaste de cratera, adesão, lascamento, abrasão e falha catastrófica da aresta de corte. A rugosidade superficial (R_a) foi reduzida em 41%–53% com nano-MQL em comparação com MQL, e em 58%–68% em relação ao torneamento a seco.

Mishra et al. (2019) estudaram o torneamento a seco da liga Ti6Al4V utilizando ferramentas de carboneto de tungstênio revestidas com PVD-TiAlN e texturizadas em *Chevron*, fabricadas por laser de fibra nanossegundo na superfície de saída da ferramenta. Os parâmetros de corte foram velocidade de corte de 100–160 m/min, avanço 0,1–0,2 mm/rev e profundidade de corte de 0,5 mm. As ferramentas texturizadas com revestimento auxiliaram na remoção de lascas, proporcionaram melhor acabamento superficial em comparação com ferramentas lisas e reduziram o raio de curvatura, melhorando o fluxo de cavacos.

2.4.9 Efeito da textura na Vida da Ferramenta de corte em peças de Ti6Al4V

A durabilidade das ferramentas durante a usinagem de Ti6Al4V é fortemente afetada pelos mecanismos de desgaste e pelas condições de contato com o material. Pesquisas têm explorado como a texturização das superfícies das ferramentas de corte atua na redução da adesão, do atrito e da temperatura na interface ferramenta–cavaco, promovendo aumento da vida útil da ferramenta. A avaliação dessas evidências permite compreender como diferentes tipos e configurações de texturas podem adiar o início do desgaste, melhorar a resistência ao desgaste adesivo e abrasivo e garantir maior consistência no desempenho durante o processo de usinagem.

Zhou et al. (2019) investigaram o fresamento do Ti6Al4V utilizando insertos de metal duro não revestidos com *grooves* paralelas à superfície de saída, obtidas por laser YAG. Como sistema lubrificante foi empregado MQL com fluido de corte convencional e nanopartículas de Fe_3O_4 , com velocidade de corte de 30–125 m/min, avanço de 0,06 mm/r e profundidade de corte de 0,6 mm. A taxa de desgaste da ferramenta e a adesão do material na peça foram significativamente reduzidas na condição com ferramenta texturizada e nanofluido, apresentando uma diminuição de 63,3% em comparação com a condição sem textura e com fluido convencional.

Su et al. (2018) investigaram os efeitos antifricção e antiaderência de texturas lineares (*grooves*) na superfície de saída de ferramentas ultraduras de diamante policristalino (PCD) durante torneamento da liga Ti6Al4V. O estudo alternou condições de corte seca e lubrificada via MQL criogênico com óleo de corte Vascomill MMS FA1, da Blaser Swisslube, utilizando velocidade de corte de 16–175 m/min, avanço 0,19 mm/rev e largura de corte de 2 mm. Ferramentas tradicionais e com *grooves* apresentaram propriedades de antiaderência similares em baixa velocidade de corte. Entretanto, em velocidades de corte mais altas, as ferramentas com *grooves* mostraram adesão de cavacos significativamente menor, com redução superior a 90 μm na largura da região de adesão do cavaco.

Mishra et al. (2018) estudaram os efeitos de texturas *Chevron* em ferramentas revestidas por PVD (AlTiN e AlCrN). As texturas foram produzidas na superfície de saída da ferramenta por laser pulsado em nanosegundos. O torneamento a seco de Ti6Al4V foi realizado com velocidade de corte de 80 m/min, avanço de 0,1 mm/rev e profundidade de corte de 1 mm. As ferramentas texturizadas e revestidas apresentaram redução nas forças de corte, força de avanço e desgaste da ferramenta. O menor desgaste foi observado nas ferramentas revestidas com AlCrN texturizadas, e as análises EBSD- *Electron Backscatter Diffraction* (Difração de Elétrons Retroespalhados) e EDS - *Energy Dispersive Spectroscopy* (Espectroscopia por Dispersão de Energia ou Energia Dispersiva de Raios X) mostraram redução na transferência do ligante (cobalto) do substrato de WC/Co, devido à ablação a laser, que promoveu a formação de óxido de cobalto e diminuiu a área de contato com o titânio.

Liu et al. (2019) realizaram, via laser pulsado de fibra ótica, texturas do tipo *groove* na superfície de saída de ferramentas WC-10Ni3Al e WC-8Co. Foram realizados torneamentos a seco e lubrificados (emulsão) em Ti6Al4V, com velocidade de corte de 50–100 m/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de corte de 1 mm. As microtexturas na superfície de saída reduziram a temperatura de corte e, conseqüentemente, o desgaste da ferramenta, atuando como reservatórios de lubrificação. Em baixa velocidade de corte (velocidade de corte de 50 m/min),

a vida útil da ferramenta foi considerada satisfatória tanto para ferramentas texturizadas quanto para não texturizadas, adotando-se como critério de vida útil um desgaste de flanco de 300 μm .

Sawant et al. (2018) estudaram a influência de texturas *spot* e *dimple*, fabricadas via deposição de pó por arco de plasma transferido por microplasma (μ -PTAPD - *microplasma transferred arc powder deposition*), na superfície de saída de ferramentas de aço rápido (HSS). O torneamento a seco de Ti6Al4V foi realizado com velocidade de corte de 45–105 m/min, avanço de 0,1 mm/rev e profundidade de corte de 1 mm. Os *dimples* atuam como barbatanas, aumentando a convecção e a transferência de calor para a atmosfera, o que beneficia significativamente a vida útil da ferramenta.

2.4.10 Efeito da textura na formação de cavacos em peças de Ti6Al4V

A formação e o escoamento dos cavacos durante a usinagem da liga Ti6Al4V constituem aspectos fundamentais para o desempenho do processo, pois estão diretamente relacionados às forças de corte, ao atrito na interface cavaco-ferramenta e ao desgaste da ferramenta. Devido à elevada resistência mecânica, baixa condutividade térmica e forte tendência à adesão dessa liga, o cavaco segmentado tende a apresentar um comportamento de escoamento irregular, o que pode intensificar as condições tribológicas na interface cavaco-ferramenta. Nesse contexto, a introdução de microtexturas na superfície das ferramentas tem sido investigada como uma estratégia para modificar o comportamento de formação e escoamento dos cavacos. Essas texturas podem atuar na redução do comprimento de contato cavaco-ferramenta, no aprisionamento de detritos e na modificação das condições de atrito, influenciando diretamente a morfologia, a evacuação e a estabilidade do fluxo de cavacos. Assim, diversos estudos têm analisado como diferentes geometrias e orientações de microtexturas podem afetar o comportamento dos cavacos durante a usinagem da liga Ti6Al4V.

Ao estudar o torneamento a seco da liga Ti6Al4V, Mishra et al. (2019) utilizaram uma ferramenta de metal duro WC-Co revestida com PVD-TiAlN e contendo texturas em formato *Chevron* para a usinagem do material. As texturas foram produzidas na superfície de saída da ferramenta por meio de laser de fibra ótica com pulsos na escala de nanossegundos. Os parâmetros de corte adotados no estudo foram velocidade de corte entre 100 e 160 m/min, avanço de 0,1 a 0,2 mm/rev e profundidade de corte de 0,5 mm. Os resultados indicaram que o comprimento de contato entre cavaco e ferramenta diminuiu nas ferramentas texturizadas quando comparado às ferramentas sem textura. Observou-se ainda uma redução mais

significativa no comprimento de contato, superior a 30%, nas ferramentas que combinavam texturização superficial com revestimento.

O estudo de Su et al. (2018) investigou os efeitos antifricção e antiaderência de texturas lineares em forma de ranhuras produzidas na superfície de saída de ferramentas ultraduras de diamante policristalino (PCD) durante o torneamento da liga de titânio Ti6Al4V. As microtexturas foram fabricadas por meio de laser de fibra ótica de baixa potência. A atmosfera de corte alternou entre condição seca e lubrificação por CMQL utilizando o fluido Vascomill MMS FA1, da Blaser Swissslube. As condições de corte adotadas foram velocidade de corte entre 16 e 175 m/min, avanço de 0,19 mm/rev e largura de corte de 2 mm. Os resultados mostraram que ferramentas convencionais e ferramentas com microrranhuras apresentaram propriedades antiaderentes semelhantes em baixas velocidades de corte. No entanto, em velocidades de corte mais elevadas, a ferramenta microtexturizada apresentou significativamente menor adesão de cavaco em comparação com a ferramenta convencional, tanto na condição seca quanto com CMQL. Especificamente, observou-se uma redução superior a 90 µm na largura da região de adesão do cavaco devido à presença das microrranhuras. As microrranhuras orientadas perpendicularmente à direção do fluxo de cavacos podem evitar o acúmulo de cavacos sobre a superfície da ferramenta e retardar o crescimento da área de adesão. Verificou-se também que ocorre a formação de TiC na superfície de saída da ferramenta durante o processo de corte. Dessa forma, o desempenho quanto à antifricção e antiaderente das ferramentas microrranhuradas pode ser atribuído aos efeitos combinados da redução do comprimento de contato cavaco-ferramenta, da capacidade das microtexturas de capturar pequenos detritos e aumentar a área de dissipação térmica, da influência das ranhuras perpendiculares ao fluxo de cavacos e da formação de uma camada de ligação de TiC.

Mishra et al. (2018) estudaram os efeitos de texturas em formato *Chevron* em dois tipos de ferramentas revestidas por PVD: AlTiN e AlCrN. As texturas foram produzidas na superfície de saída da ferramenta utilizando laser pulsado na escala de nanossegundos. Para o estudo, foi realizado o torneamento a seco da liga Ti6Al4V com velocidade de corte de 80 m/min, avanço de 0,1 mm/rev e profundidade de corte de 1 mm. Os resultados indicaram que as ferramentas texturizadas apresentaram melhor crescimento do revestimento, além de redução na formação de microcavidades e macropartículas durante a deposição PVD dos revestimentos de AlTiN e AlCrN. O aumento da área superficial proporcionado pela texturização favoreceu a dispersão e separação das gotículas metálicas (*droplets/macroparticles*) geradas durante a deposição PVD, reduzindo o recobrimento sucessivo dessas partículas e, conseqüentemente, diminuindo a formação de microdefeitos no revestimento. Além disso, o fenômeno de intertravamento

mecânico entre o revestimento e o substrato texturizado também contribuiu para gerar uma melhora em relação à adesão do revestimento à superfície de saída da ferramenta de corte texturizada.

Su et al. (2017) investigaram o desempenho de ferramentas de diamante policristalino (PCD) texturizadas durante o torneamento a seco da liga de titânio Ti6Al4V. Para isso, foi fabricado um arranjo regular de microrranhuras paralelas à aresta principal de corte na superfície de saída da ferramenta, utilizando laser de fibra ótica. Os parâmetros de corte adotados foram velocidade de corte entre 16 e 125 m/min, avanço de 0,19 mm/rev e profundidade de corte de 2 mm. Os resultados mostraram que o comportamento de atrito na interface cavaco–ferramenta pode ser significativamente melhorado com o uso de ferramentas de PCD microtexturizadas em comparação com ferramentas de PCD sem textura, mesmo na ausência de lubrificantes.

No estudo de Niketh e Samuel (2017), microtexturas em forma de cavidades (*dimples*) foram produzidas nos canais de escoamento dos cavacos e na região da guia cilíndrica de uma broca (modelo DTC 300 da Ace Manufacturing Systems) utilizando a técnica de microusinagem a laser. Foram realizados ensaios de furação a seco na liga Ti6Al4V com velocidade de corte entre 30 e 60 m/min, avanço entre 0,04 e 0,07 mm/rev e diâmetro da broca de 10 mm. Os resultados mostraram que os *microdimples* localizados na região da guia cilíndrica da broca foram eficazes na redução do atrito de deslizamento entre a ferramenta e a parede do furo usinado, minimizando a adesão do material da peça à ferramenta. Além disso, as texturas presentes nos canais de escoamento dos cavacos da broca contribuíram para reduzir o comprimento de contato do cavaco ao longo da ranhura helicoidal da ferramenta, ajudando a controlar o fenômeno de entupimento de cavacos e resultando em menor força necessária para a evacuação dos cavacos durante o processo de furação.

No trabalho de Liu et al. (2019), foram produzidas texturas do tipo ranhura na superfície de saída de dois tipos de ferramentas, WC-10Ni3Al e WC-8Co, utilizando a técnica de texturização com laser de fibra ótica pulsado. Para avaliar o desempenho dessas ferramentas, foram realizados ensaios de torneamento da liga Ti6Al4V tanto em condição a seco quanto com lubrificação por emulsão. Os parâmetros de corte utilizados foram velocidade de corte entre 50 e 100 m/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de corte de 1 mm. Os resultados indicaram que as microtexturas foram capazes gerar uma redução, em até certa medida, da adesão de material na região da superfície de saída da ferramenta de corte texturizada durante o processo de usinagem.

2.5 Laser de Femtossegundos

Existem diversos métodos para a produção de texturas em ferramentas de corte, cada um com suas vantagens e limitações. Entre os mais utilizados estão os lasers: FIB - *Focused Ion Beam* (Feixe de Íons Focalizado), μ -AB - *Micro Abrasive Blasting* (Microjateamento Abrasivo), EVC - *Elliptical Vibration Cutting* (Corte por Vibração Elíptica), EDM - *Electrical Discharge Machining* (Eletroerosão / Usinagem por Descarga Elétrica), ICPE - *Inductively Coupled Plasma Etching* (Corrosão/Gravação por Plasma Indutivamente Acoplado), PAWAJM - *Pulsed Abrasive Waterjet Machining* (Usinagem por Jato d'Água Abrasivo Pulsado) e μ -PTAPD - *Micro Powder-Particle Assisted Processing/Deposition* (Processamento/Deposição Assistido por Micropartículas de Pó). Indo além, em alguns casos menos comuns, pesquisadores recorrem até a indentadores de dureza para gerar padrões na superfície da ferramenta. Com os avanços tecnológicos, certos métodos se tornaram mais acessíveis e eficientes, consolidando-se como preferenciais para texturização. Conforme revisado por Machado et al. (2021), entre 2017 e 2021, os dois métodos mais empregados foram laser, presente em 65% dos estudos, e EDM, utilizado em 19%. Apesar de o laser dominar em frequência de uso, o EDM continua sendo uma alternativa relevante devido ao seu menor custo. A Figura 10 apresenta uma comparação entre os efeitos desses métodos (e de outros) sobre os danos superficiais e as dimensões das texturas geradas.

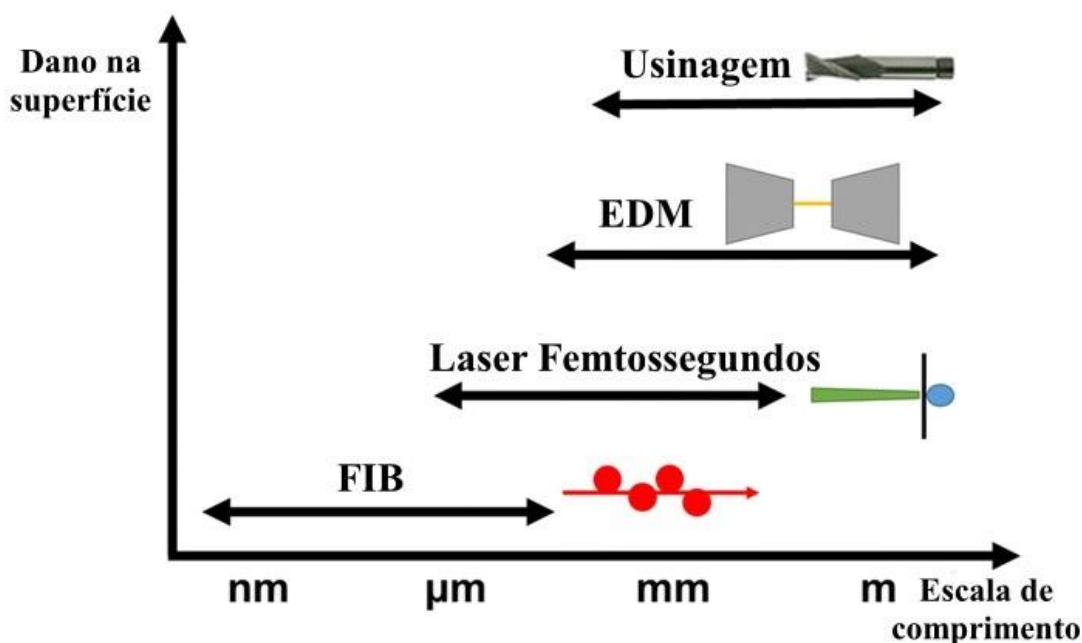


Figura 10 – Comparação de escalas de comprimento acessíveis por várias técnicas de usinagem. Fonte: adaptado de Mcculloch, Gigax e Hosemann (2020).

A aplicação do laser constitui um processo de usinagem não convencional no qual a remoção de material ocorre predominantemente por mecanismos térmicos de fusão e vaporização localizada, diferentemente da usinagem convencional, em que a remoção se dá principalmente por cisalhamento mecânico com formação de cavacos. O acrônimo LASER., do inglês *light amplification by stimulated emission of radiation*, traduz-se como Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação. O princípio básico da maioria dos lasers envolve a excitação de elétrons orbitais em átomos ou moléculas para níveis de energia superiores por absorção de um quantum. Ao retornarem ao estado fundamental, esses elétrons liberam energia em forma de luz, cujo fóton possui energia inferior àquela absorvida. Desse modo, a emissão laser apresenta comprimento de onda definido (monocromático), alta colimação e coerência de fase entre os fótons.

Tais propriedades, juntamente com o perfil de intensidade gaussiano, permitem focalizar o feixe em dimensões equivalentes à ordem de grandeza do comprimento de onda, geralmente na faixa micrométrica. Nos lasers pulsados o controle da energia e da largura temporal dos pulsos, possibilita intensidades elevadas capazes de fundir, vaporizar ou ablacionar materiais de maneira controlada. O laser se tornou popular na fabricação de texturas devido à elevada precisão e reprodutibilidade. Entre os tipos de laser, os excimer, emitindo no ultravioleta, são indicados para polímeros e cerâmicos, enquanto os de neodímio como o Nd:YAG, ou os de itérbio como os de fibra ópticas, são recomendados para marcações e furações. Para microusinagem em metais, lasers pulsados com duração de micro ou nanossegundos são essenciais, pois o controle das características dos pulsos influencia diretamente os danos térmicos e mecânicos, como rebarbas, trincas e alterações na microestrutura (Preuss, Demchuk e Stuke, 1995; Krueger e Kautek, 1995). Estes fenômenos podem ocorrer em menor ou maior escala nestes tipos de lasers e um controle preciso dos parâmetros de processo é fundamental para minimizá-los.

Os lasers de femtossegundos, com pulsos na ordem de dezenas a centenas de femtossegundos ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$), são capazes de processar metais, cerâmicos, polímeros e semicondutores sem causar danos térmicos ou mecânicos significativos. A transferência de calor é tão reduzida que este tipo de laser pode conseguir cortar até mesmo materiais explosivos sem causar ignição (Fermann, Galvanauskas e Sucha, 2002). Por estas características, o laser de femtossegundos tornou-se comum tanto em pesquisas quanto em aplicações industriais e médicas. Além disso, fatores como custo, confiabilidade e eficiência também devem ser considerados na escolha do laser.

Uma diferença crucial entre lasers de femtossegundos e de nanossegundos está no efeito térmico durante a ablação: no caso do laser de pulso longo (nanossegundos), elétrons e rede cristalina atingem equilíbrio térmico durante o pulso, permitindo que o calor se difunda para regiões adjacentes e influencie termicamente o material. Já o laser de femtossegundos promove absorção da radiação pela superfície via elétrons ligados e livres, simultaneamente à excitação e ionização do material. A energia é rapidamente transferida ao subsistema atômico, quebrando ligações e provocando expansão local sem significativa dissipação de calor. A Figura 11 ilustra esse efeito, em que um laser de pulso longo deixa uma grande zona afetada pelo calor (ZAC), enquanto um laser de femtossegundos não.

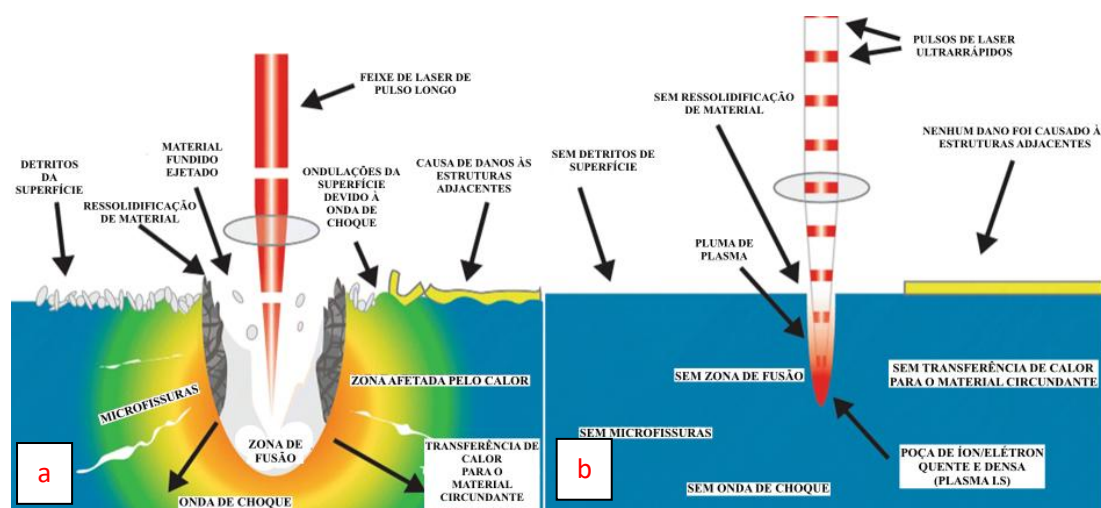


Figura 11 – Um diagrama comparando a usinagem a laser de pulso longo (a) e de femtossegundos (b). Fonte: adaptado de Mcculloch, Gigax e Hosemann (2020).

A ablação típica gerada por laser de femtossegundos em materiais sólidos ocorre com energia na faixa de 10^1 a $10^2 \mu\text{J}$. Quando esses pulsos atingem o material, a duração da incidência é menor do que o período vibracional dos íons da rede cristalina. Assim, a maior parte da energia do pulso é absorvida pelos elétrons, promovendo seu aquecimento. Entretanto, antes da ruptura das ligações químicas, pode ocorrer um aquecimento mínimo da rede, formando uma pequena ZAC (zona afetada pelo calor), que pode ser controlada ou praticamente eliminada ajustando-se os parâmetros de irradiação (Samad et al., 2012).

Para dielétricos, o processo de ejeção do material se caracteriza pela explosão dos íons (Reif e Costache, 2006; Bulgakova et al., 2005), na qual os elétrons vibram e se desprendem devido à alta energia cinética adquirida, provocando um desequilíbrio de carga na rede. Esse desequilíbrio induz uma expansão adiabática, ejetando e eliminando tanto a camada superficial

quanto a maior parte da energia térmica. Em certos casos, a ejeção não é completa, deixando fragmentos remanescentes.

Nos dielétricos, o mecanismo apresentado inclui uma fase inicial em que a região focal se torna localmente metálica antes de ocorrer a ablação completa. Para materiais não metálicos, elétrons livres surgem na superfície pela excitação dos elétrons da camada de valência via multifotoionização do laser (Stuart et al., 1995; Kautek et al., 1996). Depois dessa etapa, o material passa a absorver energia de forma mais intensa, ocorrendo fusão localizada, vaporização parcial e ejeção de material predominantemente líquido, além da possível formação de nanopartículas sólidas resultantes dos fenômenos de expansão rápida e explosão de fase induzidos pelo laser. Em raras situações, o procedimento é realizado em vácuo ou com gases inertes para maior controle.

Um exemplo de uma aplicação prática do laser de femtossegundos consiste na texturização de superfícies, gerando estruturas topográficas de acordo com um modelo préestabelecido. Pequenos orifícios ou canais produzidos de forma repetitiva e em escala controlada funcionam de maneira similar à microusinagem CNC, permitindo alta precisão dimensional. Estruturas complexas podem ser obtidas desde que os fenômenos gerados pelo laser no material sejam compreendidos. As precisões lateral e vertical dependem do comprimento de onda e da fluência aplicada, sendo essencial definir o percurso do laser, a densidade de energia e a taxa de sobreposição de pulsos (Figura 12).

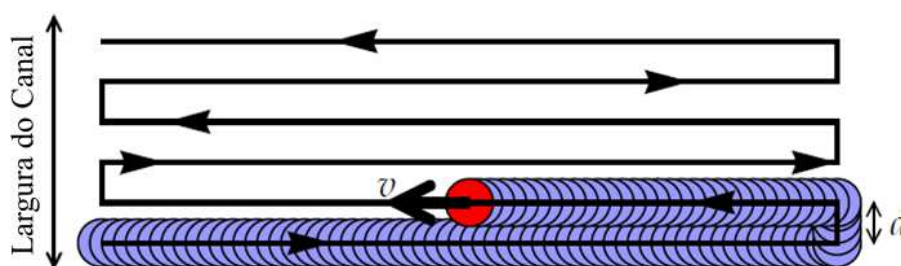


Figura 12. Diagrama do caminho do feixe laser. A direção de varredura é normalmente paralela ao eixo longitudinal do canal. Fonte: adaptado de Samad et al. (2012).

O planejamento do trajeto e a quantidade de pulsos são fatores essenciais, já que os danos em um ponto aumentam proporcionalmente ao número de disparos de laser sobre a mesma região. O mesmo princípio se aplica ao aumento da energia do pulso. Por isso, costuma-se utilizar um modelo 2D para definir o percurso do laser, enquanto a profundidade final é determinada pelos parâmetros de operação, como frequência, potência e velocidade, ajustados ao material a ser usinado.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho teve como objetivo determinar a combinação ótima de parâmetros geométricos de texturização aplicados a ferramentas de corte destinadas ao torneamento da liga Ti6Al4V.

A partir dessa etapa preliminar, foi conduzido um ciclo iterativo de experimentação visando à otimização dos parâmetros geométricos da textura. Para tal, adotou-se a metodologia de Planejamento Composto Central (PCC), a qual permitiu a modelagem estatística das respostas e a construção de superfícies de resposta. Essa abordagem exigiu a realização de novos ensaios com base nos resultados obtidos em etapas anteriores, possibilitando a convergência progressiva para a condição ótima de operação.

Ao final do processo de otimização, a ferramenta texturizada com parâmetros otimizados teve seu desempenho comparado ao de uma ferramenta não texturizada, considerando como variáveis-resposta a força de usinagem, a vida da ferramenta e a rugosidade superficial da peça usinada.

Cabe ressaltar que este trabalho se fundamentou em trabalhos anteriores que investigaram os efeitos da texturização na usinagem. Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e Laboratório de Usinagem Convencional (LUC), na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), e os resultados obtidos foram analisados por meio de métodos estatísticos adequados, garantindo confiabilidade e validade científica às conclusões.

O material selecionado para o estudo foi a liga de titânio grau 5 (Ti6Al4V), amplamente utilizada em setores estratégicos devido à sua elevada resistência mecânica e excelente resistência à corrosão, mas que apresenta reconhecidas dificuldades durante a usinagem, devido à baixa condutividade térmica e alta reatividade química. A aplicação de texturas superficiais na ferramenta de corte busca mitigar essas limitações, reduzindo atrito, temperatura e adesão de material, contribuindo para a melhoria do desempenho do processo. Destaca-se ainda que o uso de texturas nessa aplicação específica permanece pouco explorado na literatura, o que reforça a relevância científica da presente investigação ao buscar identificar combinações ótimas de parâmetros para aprimorar a usinagem desse material de elevada importância tecnológica.

O projeto foi desenvolvido em parceria com o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), por meio de colaboração entre os orientadores desta tese, instituição que disponibiliza um sistema de laser com pulsos na ordem de femtossegundos, equipamento

fundamental para garantir elevada qualidade geométrica e integridade superficial das texturas produzidas. O trabalho também contou com a colaboração da Sandvik Coromant, por intermédio do Dr. Denis Boing (Sandvik, Estocolmo, Suécia), que forneceu suporte técnico especializado, além das ferramentas e apoio necessários ao desenvolvimento experimental e da Blaser Swissslube do Brasil Ltda que forneceu o fluido de corte.

3.1 Equipamentos e Insumos

Para a execução desta pesquisa, foram utilizados diversos equipamentos e insumos essenciais à condução dos ensaios experimentais, abrangendo máquinas-ferramenta, sistemas de medição e aquisição de dados, ferramentas de corte, material da peça e reagentes para caracterização. Esses recursos foram fundamentais para a montagem da bancada experimental e para a obtenção dos resultados apresentados neste estudo. A seguir, estão listados os equipamentos e insumos empregados, os quais serão posteriormente citados e descritos com maior detalhamento ao longo do desenvolvimento do trabalho, conforme sua aplicação em cada etapa experimental:

- Torno CNC Multiplic 35D [disponível: LUC-UFU]
- Insertos SPUN120304 H13A WC+Co [fornecidos pela Sandvik Coromant]
- Suporte para os insertos CSRPR 2525 M12 [fornecido pela Sandvik Coromant]
- Laser de femtossegundos (Femtopower 10 kHz) [disponível: IPEN/CNEN]
- Barras de titânio Grau 5 Ti6Al4V [disponível: LEPU-UFU]
- Fluido de corte Vasco 7000 [fornecidos pela Blaser Swissslube]
- Dinamômetro Kistler 9265B [disponível: LUC-UFU]
- Amplificador de sinal Kistler 5019 [disponível: LUC-UFU]
- Rugosímetro Mitutoyo SJ-201 [disponível / LEPU-UFU]
- Microscópio ferramenteiro SZ6145TR - OLYMPUS [disponível: LEPU-UFU]
- Microscópio eletrônico de varredura - MEV Zeiss EVO MA10 [disponível: IQ-UFU]
- Microdurômetro HMV-2 Shimadzu [disponível: LTM-UFU]
- Computadores com os softwares necessários [disponível: LEPU-UFU]
- Lubrificante sólido de MoS₂ [disponível: LEPU-UFU]
- Ácido Fluorídrico (HF) para ataque e metalografia [disponível: IQ-UFU]

3.2 Planejamento Geral

A metodologia completa da pesquisa foi estruturada em estágios, os quais serão detalhadamente descritos nas seções seguintes, conforme o fluxograma da Figura 13.

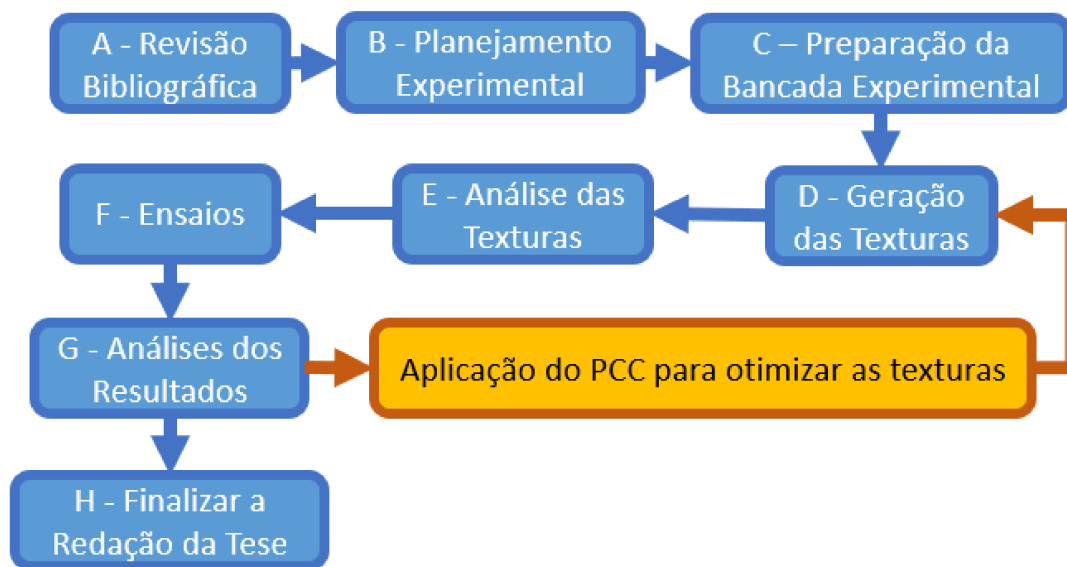


Figura 13 - Fluxograma dos estágios do projeto. A seta laranja indica um retorno à etapa de experimentos, pois foram 3 etapas de experimentos (ver Subseção 3.2.2).

3.2.1 Estágio A - Revisão bibliográfica

A maior parte da revisão bibliográfica foi desenvolvida no início do doutorado, estabelecendo a base teórica necessária para a condução da pesquisa. Entretanto, novas consultas foram realizadas ao longo de todo o trabalho, com o objetivo de incorporar publicações recentes e manter a fundamentação sempre atualizada, especialmente considerando a constante evolução das técnicas de texturização e dos estudos em usinagem de ligas de titânio.

A estratégia de revisão foi estruturada de forma progressiva e sistemática. Inicialmente, foram selecionados artigos científicos relacionados à texturização de ferramentas de corte, abrangendo diferentes métodos de fabricação (laser, ataque químico, EDM, entre outros), geometrias de textura, mecanismos tribológicos envolvidos e impactos no desempenho de usinagem. Essa etapa teve como finalidade compreender o estado da arte de forma ampla, identificando tendências, lacunas e parâmetros geométricos mais frequentemente investigados.

Em seguida, a revisão foi direcionada especificamente para estudos envolvendo a liga Ti6Al4V, material de interesse desta tese, devido à sua ampla aplicação industrial e reconhecida

dificuldade de usinagem. Nessa etapa, foram analisados trabalhos que abordam os mecanismos de desgaste, formação de cavaco, geração de calor e interação ferramenta-peça nessa liga.

Por fim, a análise foi ainda mais aprofundada, concentrando-se em artigos que investigaram o torneamento do Ti6Al4V com ferramentas texturizadas. Esse refinamento permitiu a construção de uma base de dados técnica mais específica, reunindo informações sobre dimensões de textura (largura, profundidade, espaçamento), posicionamento em relação à aresta de corte, parâmetros de corte adotados e resultados obtidos em termos de desgaste, forças e acabamento superficial.

A revisão bibliográfica, apresentada no Capítulo 2, adotou uma abordagem escalonada, do geral para o específico, que possibilitou a construção de uma base sólida e abrangente de informações, fundamental para a definição dos parâmetros geométricos das texturas que foram utilizados nos testes preliminares do presente trabalho.

3.2.2 Estágio B - Planejamento experimental

Com base em toda a informação obtida na revisão bibliográfica, e nos equipamentos disponíveis, foram selecionadas as melhores combinações de variáveis, relacionadas às texturas, para realizar a primeira etapa de experimentos, mesclando os trabalhos que abordaram a usinagem (mais especificamente o torneamento) de Ti6Al4V com ferramentas texturizadas.

Os parâmetros de entrada foram planejados sobre a seguinte estratégia:

- Direção: textura em formas de sulcos (também sendo referidos como canais ou ranhuras, e mais comumente no inglês referidos como *grooves*) 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/espaçamento): são os parâmetros mais influentes no processo em se tratando de texturas. Foi mantida uma correlação com a largura e o distanciamento entre as texturas, a fim de evitar que houvesse um efeito de acumulador de tensão, o qual poderia quebrar a ferramenta durante o corte.
- Distância da Aresta de Corte: uma variável pouco pesquisada na literatura, mas com grande impacto no efeito da textura durante o corte. Foram utilizadas diferentes distâncias da aresta de corte.

- Avanço e Velocidade: a usinagem foi feita com diferentes valores, sendo um deles considerado alto para a usinagem de ligas de titânio e um segundo valor em uma faixa usual às condições de corte.
- Lubrificação: Os testes de vida foram feitos com aplicação de fluido de corte em abundância e com lubrificante sólido de MoS_2 . Diversos autores citam a capacidade da textura em conter lubrificante sólido (Subseção 2.4.5). Assim, buscando uma alternativa aos lubrificantes líquidos, que são em sua maioria nocivos ao meio ambiente, foi estudada a aplicação de lubrificantes sólidos nas superfícies de saída das ferramentas, no caso o MoS_2 . Este tipo de lubrificação contribuiu para uma usinagem mais sustentável. Assim, foram realizados testes com fluido de corte aplicado em abundância e alternando a presença ou ausência de MoS_2 impregnado nas texturas.

Os experimentos desenvolvidos nesta tese foram estruturados em 3 etapas principais, organizadas de forma sequencial e evolutiva. A Etapa 1 consistiu na definição das geometrias iniciais de textura a partir da média dos parâmetros geométricos identificados na literatura para o torneamento da liga Ti6Al4V, garantindo que os testes preliminares partissem de uma base técnica consolidada e coerente com o estado da arte. Na Etapa 2, foi aplicado o método do Planejamento Composto Central (PCC), permitindo a avaliação sistemática da influência das variáveis geométricas da textura e a modelagem estatística do comportamento do processo, com vistas à determinação da condição ótima. Por fim, na Etapa 3, a geometria considerada ótima foi validada experimentalmente por meio da comparação direta com uma ferramenta convencional sem textura, possibilitando quantificar os ganhos efetivos em desempenho de usinagem e consolidar as conclusões do estudo.

O Planejamento Composto Central (PCC), inserido na Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), combina pontos fatoriais, pontos centrais e pontos axiais para permitir o ajuste de um modelo polinomial de segunda ordem. Quando conduzido sequencialmente, realiza-se inicialmente uma etapa com os pontos fatoriais e centrais, por meio da qual são estimados os efeitos lineares e as interações entre os fatores, além de ser verificada a existência de curvatura na região experimental. Com base nesses resultados, acrescenta-se uma nova etapa contendo os pontos axiais, posicionados a uma distância $\pm\alpha$ do ponto central em cada eixo experimental, enquanto os demais fatores permanecem em seus níveis centrais. A inclusão desses pontos possibilita estimar os termos quadráticos e, conseqüentemente, construir superfícies de resposta e gráficos de contorno que representam o comportamento da variável analisada. Após a avaliação da significância do modelo por meio da ANOVA, essas superfícies permitem

identificar a combinação de fatores associada à resposta ótima, a qual deve ser posteriormente confirmada por ensaios de validação (Myers, Montgomery e Anderson-Cook, 2016).

Para a Etapa 1 foram realizados 8 tipos diferentes de texturas (variando direção, profundidade e distância da aresta principal de corte) e dois níveis de avanço diferentes, que foram experimentadas em testes de usinagem, configurados por um fatorial fracionado do tipo 2^4 com réplica e tréplica dos testes, conforme Quadro 1. A variação do avanço foi importante para explorar a variação do comprimento de contato cavaco-ferramenta. Os níveis das variáveis de entrada estudadas estão informados adiante, no Capítulo 4 (Resultados e Discussões). É importante ressaltar que, além da combinação de ensaios citados no Quadro 1, também foram realizados ensaios com ferramentas lisas nas mesmas condições de usinagem, para comparações. Foram consideradas as seguintes variáveis de saída: componentes da força de usinagem e a rugosidade das superfícies usinadas.

ETAPA 1: Fatorial Completo 2^4					
Variáveis de Saída: Força e Rugosidade					
Nº de condições	TIPOS DE TEXTURAS	Variáveis da Textura			Variável do Corte
		DIREÇÃO	DISTÂNCIA DA ARESTA DE CORTE	DIMENSÕES: PROFUNDIDADE, LARGURA E ESPAÇAMENTO	AVANÇO
1.1	T1.1	-1	-1	-1	-1
1.2	T1.2	+1	-1	-1	-1
1.3	T1.3	-1	+1	-1	-1
1.4	T1.4	+1	+1	-1	-1
1.5	T1.5	-1	-1	+1	-1
1.6	T1.6	+1	-1	+1	-1
1.7	T1.7	-1	+1	+1	-1
1.8	T1.8	+1	+1	+1	-1
1.9	T1.1	-1	-1	-1	+1
1.10	T1.2	+1	-1	-1	+1
1.11	T1.3	-1	+1	-1	+1
1.12	T1.4	+1	+1	-1	+1
1.13	T1.5	-1	-1	+1	+1
1.14	T1.6	+1	-1	+1	+1
1.15	T1.7	-1	+1	+1	+1
1.16	T1.8	+1	+1	+1	+1
Testes Extras					
1.TE1	sem textura	sem textura	sem textura	sem textura	-1
1.TE2	sem textura	sem textura	sem textura	sem textura	+1

Quadro 1 – Matriz de planejamento dos experimentos para a Etapa 1.

Com a Etapa 1 de ensaios concluída, foi 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, iniciou-se na Etapa 2 um planejamento composto central (PCC), o qual é capaz de determinar duas condições ótimas para duas variáveis utilizando técnicas de MSR (superfícies de respostas), considerando os modelos da Etapa anterior (que gerou resultados de força e rugosidade). O Quadro 2 exemplifica como fica este planejamento após definir as variáveis mais influentes do primeiro planejamento. No Quadro 2, a distância da textura em relação à aresta de corte e a dimensão das texturas são apresentadas como possíveis variáveis mais influentes.

ETAPA 2: Planejamento Composto Central (exemplo de 3 variáveis)				
Variáveis de Saída: Força e Rugosidade				
Nº de condições	TIPOS DE TEXTURAS	Variáveis mais Influentes na Etapa 1		
		Variável 1	Variável 2	Variável 3
2.1	T1	-1	-1	-1
2.2	T1	+1	-1	-1
2.3	T1	-1	+1	-1
2.4	T1	+1	+1	-1
2.5	T1	-1	-1	+1
2.6	T1	+1	-1	+1
2.7	T1	-1	+1	+1
2.8	T1	+1	+1	+1
2.9	T2.0	0	0	0
2.10	T2.0	0	0	0
2.11	T2.1- α	- α	0	0
2.12	T2.1+ α	+ α	0	0
2.13	T2.2- α	0	- α	0
2.14	T2.2+ α	0	+ α	0
2.15	T2.3- α	0	0	- α
2.16	T2.3+ α	0	0	+ α
Testes Extras				
2.TE1	sem textura	sem textura	sem textura	0
2.TE2	sem textura	sem textura	sem textura	- α
2.TE3	sem textura	sem textura	sem textura	+ α

Quadro 2 – Matriz de planejamento dos experimentos para a Etapa 2.

Na Etapa 3 foram utilizadas as dimensões da textura e o avanço ótimos obtidos na Etapa 2 para então investigar o efeito de velocidade de corte, da presença da textura (testes em ferramentas com e sem textura), e da 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, foi utilizado um planejamento fatorial 2³ e somente nesta etapa que a vida da ferramenta foi uma variável de saída estudada. O Quadro 3 mostra o planejamento desta última etapa de experimentos.

ETAPA 3: Fatorial Completo 2 ³			
Variáveis de Saída: Força, Rugosidade e Vida			
Nº de condições	Textura Otimizada x Lisa		
	PRESENÇA DE TEXTURA	VELOCIDADE DE CORTE	PRESENÇA DE MoS ₂
3.1	-1	-1	0
3.2	+1	-1	-1
3.3	-1	+1	0
3.4	+1	+1	-1
3.5	-1	-1	0
3.6	+1	-1	+1
3.7	-1	+1	0
3.8	+1	+1	+1

Quadro 3 – Matriz de planejamento dos experimentos para a Etapa 3.

3.2.3 Estágio C - Preparação da bancada experimental

Neste estágio foram preparados os experimentos de usinagem, contemplando todas as ações preliminares necessárias à realização da investigação experimental.

O principal insumo do projeto foi a barra de titânio, previamente adquirida pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da UFU. Posteriormente, foram providenciadas as ferramentas de corte da classe S e seus respectivos suportes, bem como o reagente para ataque químico das amostras da peça de titânio e dos cavacos, para fins de

caracterização metalográfica (ácido fluorídrico). Também foi providenciado o envio das ferramentas ao IPEN, em São Paulo/SP, onde foi realizada a texturização a laser.

No que se refere às ferramentas de corte e suportes, foram realizados contatos com empresas parceiras do Laboratório LEPU/LUC, obtendo-se êxito na obtenção desses componentes com a Sandvik Coromant, sediada na Suécia, por meio de colaboração institucional.

Os experimentos foram conduzidos no LEPU/LUC, destacando-se o uso do torno CNC Romi Multiplic 35D, que constituiu o equipamento principal da bancada experimental, sendo os demais dispositivos (como dinamômetro, amplificador de sinal e sistema de aquisição de dados) integrados ao torno para compor o arranjo experimental completo.

3.2.4 Estágio D - Geração das Texturas

As texturas foram realizadas na superfície de saída da ferramenta, sendo produzidas por usinagem a Laser de Femtossegundos (pulsos ultracurtos), equipamento pertencente ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, vinculado à Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN. Este equipamento possui precisão de 10 nm e ponto focal de 3,6 μm .

3.2.5 Estágio E - Análises das Texturas

Para este estágio, as texturas foram analisadas (e reanalisadas após a usinagem) por meio das seguintes técnicas:

- Microscopia óptica: realizada com o objetivo de visualizar e ilustrar as texturas produzidas e então explicar a diferença entre os tipos desenvolvidos (foco na direção e na geometria das texturas).
- Perfilometria 3D: Com software MountainsMap, foram conferidas as dimensões produzidas, observando se estavam dentro dos valores médios esperados, condizentes com a precisão do laser (foco em profundidade, largura e espaçamento das texturas).
- Análise Química: Feita por MEV e EDS.

3.2.6 Estágio F - Ensaios

Após a caracterização das texturas e sua limpeza e polimento (com pasta diamantada com granulometria de 0,5 μm) para a redução de possíveis tensões residuais, foram realizados

ensaios com fluidos de corte aplicados em abundância. Primeiramente foram realizados “pré-testes” com as ferramentas lisas, que forneceram uma base para guiar possíveis alterações nos ensaios com ferramentas texturizadas (definição de parâmetros e condições de ensaios).

Dessa maneira, os ensaios ocorreram em 3 Etapas, como descrito na Subseção 3.2.2, em que ao final da análise dos resultados de uma etapa, novas texturas foram produzidas e um novo ciclo de ensaios foi realizado, conforme o fluxograma mostrado na Figura 13.

Testes específicos foram desenvolvidos para estudar o comportamento das forças de usinagem e das rugosidades. As forças de usinagem foram medidas com o auxílio do dinamômetro piezoelétrico, modelo 9265-B fabricado pela Kistler Group (mais detalhes são apresentados na Subseção 3.6.2, adiante). A rugosidade da barra de titânio pós usinagem foi medida com um rugosímetro Mitutoyo SJ201. Os cavacos foram coletados e analisados posteriormente, com o auxílio de micrômetro, paquímetro, microscópios óptico e eletrônico de varredura (MEV) e microdurômetro, buscando investigar suas características para as várias condições de corte analisadas.

3.2.7 Estágio G - Análises dos resultados

Neste estágio, um tratamento de dados foi feito para permitir a análise dos resultados obtidos nos ensaios. Análise de variância (ANOVA) foi realizada para determinar a interdependência das variáveis de entrada abordadas e seu grau de influência nos resultados. Dessa forma, os dados obtidos nos ensaios foram tratados estatisticamente e com base nessa análise, foram propostas novas geometrias de textura, ajustando-se parâmetros como dimensões, espaçamento e posicionamento em relação à aresta de corte. A partir dessas novas configurações, foi conduzida uma nova etapa de ensaios, de modo a validar as modificações implementadas. Esse processo iterativo de análise, proposição e reavaliação foi repetido até que as geometrias de textura apresentassem desempenho consistente e superior, sendo então consideradas ótimas dentro das condições investigadas neste trabalho, fechando o ciclo do fluxograma exibido na Figura 13.

3.2.8 Estágio H - Finalização da redação da tese

A tese foi produzida aos poucos ao longo de todo o desenvolvimento do projeto, e paralelamente foram produzidos artigos científicos baseados nos resultados encontrados no decorrer dos estudos. Um deles já se encontra publicado, trata-se de De Souza et al. (2026).

3.3 Ferramentas de Corte de Metal Duro e Suporte

As ferramentas de corte utilizadas nos ensaios de torneamento consistem em insertos intercambiáveis SPUN 120304 H13A, de metal duro, amplamente empregado em operações de usinagem devido à sua elevada dureza, resistência ao desgaste e estabilidade térmica. Esse material é tipicamente composto por partículas duras de carbeto de tungstênio (WC) ligadas por uma fase metálica, o cobalto (Co), conferindo maior tenacidade ao material. Essas ferramentas não possuem revestimento e apresentam superfície de saída lisa, sem quebra-cavaco. A característica da superfície de saída da ferramenta lisa facilita a geração da textura pelo laser. A geometria do inserto (ângulo de saída, ângulo de folga, raio de ponta e formato da pastilha) também exerce influência direta na formação do cavaco, nas forças de corte e na qualidade superficial da peça usinada. A Figura 14 apresenta a imagem real da ferramenta de corte utilizada neste trabalho, e o desenho esquemático contendo suas principais dimensões e elementos geométricos. As especificações técnicas e características da ferramenta, como material do inserto, geometria e dimensões principais, são apresentadas na Tabela 3. A Figura 15 mostra a ferramenta montada em seu respectivo suporte, na posição de torneamento da direita para a esquerda.

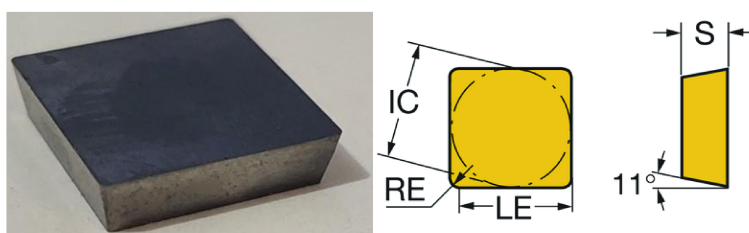


Figura 14 – Exemplo de uma das ferramentas SPUN 120304 H13A, e seu respectivo desenho esquemático.

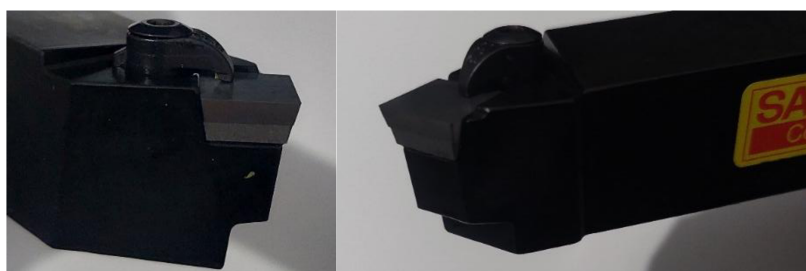


Figura 15 – Ferramenta de corte montada sobre um suporte fornecido pela empresa Sandvik®.

Tabela 3 – Parâmetros e especificações da ferramenta de corte SPUN 120304 H13A.

Parâmetro	Especificação
Materiais da peça de trabalho (TMC1ISO)	P, M, K, N, S
Quebra-Cavacos (CBMD)	PUN
Tipo de operação (CTPT)	Capaz de acabamento
Código de estilo de montagem (IFS)	Sem furo de fixação
Tamanho e formato de inserção (C_S)	SP1203
Contagem de pontas (CEDC)	4
Diâmetro do círculo inscrito (CI)	12,7 mm
Código de forma do inserto (SC)	Quadrado
Comprimento efetivo da aresta de corte (LE)	12,3 mm
Raio de canto (RE)	0,3969 mm
Mão (HAND)	Neutro
Classe / Grau (GRADE)	H13A
Substrato (SUBSTRATE)	HW (metal duro)
Espessura do inserto (S)	3,175 mm
Ângulo de folga principal (AN)	11°
Peso (WT)	0,006 kg
Assento do inserto (SSC_M)	12

3.4 Produção da Textura

Para a definição da geometria das texturas produzidas no primeiro lote das ferramentas de corte destinadas ao torneamento da liga Ti6Al4V, foi realizada inicialmente uma revisão de diversos trabalhos presentes na literatura, com o objetivo de identificar tendências já consolidadas e parâmetros frequentemente empregados na texturização de ferramentas para a usinagem desse material. A liga Ti6Al4V apresenta características particulares, como baixa condutividade térmica, elevada reatividade química e tendência à adesão, fatores que tornam sua usinagem desafiadora e motivam o uso de superfícies texturizadas para reduzir atrito, temperatura e adesão de material na ferramenta.

A partir da análise dos trabalhos revisados observou-se que a maior parte dos estudos que investigaram a texturização de ferramentas para o torneamento dessa liga, utiliza texturas do tipo *groove* (sulcos), aplicadas na superfície de saída da ferramenta. Esse tipo de geometria tem sido amplamente adotado devido à sua capacidade de reduzir a área real de contato entre a ferramenta e o cavaco (Machado et al., 2021).

Dessa forma, considerando as tendências observadas na literatura, optou-se por utilizar texturas lineares do tipo *groove* neste trabalho. Para a definição das dimensões geométricas da textura (profundidade, largura, espaçamento entre os sulcos e distância em relação à aresta de corte) foram analisados os valores empregados nos diferentes estudos revisados. A partir desse levantamento, foi definida uma geometria representativa baseada em valores médios, adotando-se ainda o arredondamento desses parâmetros para facilitar tanto a fabricação das texturas quanto a padronização dos experimentos. Os valores finais utilizados como base para a geometria da textura são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros da geometria da textura para artigos revisados no torneamento de Ti6Al4V. Média e desvio-padrão apresentados foram arredondados. A Figura 22 colabora para o entendimento do sentido físico de cada um dos parâmetros apresentados.

Artigos que estudaram torneamento de Ti6Al4V com ferramenta texturizada	Ângulo do Sulco (°)	Parâmetros Geométricos da Textura			Distância da aresta de corte (μm)
		Profundidade (μm)	Largura (μm)	Espaçamento (μm)	
Su et al. (2018)	0	53	60	85	300
Su et al. (2017)	0	51-54	56-60	86	330
Li et al. (2017)	0 e 90	30-50	300	100-300	100
Liu et al. (2019)	0	60	35	100	100
Patel et al. (2020)	45	10-30	100	15-100	100
Hosokawa et al., 2022	33	60	100	100	180
Siju et al. (2022)	90	-	80	80	50
Fouathiya et al. (2021)	0 e 90	4	10	25-90	-
Siju e Waigaonkar (2021)	90	80	80	150	50
Zhang et al. (2023)	0	8	30	150	400
Uhlmann e Schröter (2020)	0 e 45	30	60	15	120
Uhlmann e Schröter (2021)	0 e 45	30	60	15	120
Uhlmann et al. (2022)	0 e 45	30	60	15	120
Fernández-Lucio et al. (2021)	0,45 e 90	8	51	56	50
Zhang et al. (2020)	45	10	103	50	0
Li et al. (2022)	90	135	210-295	155	285
média -desvio padrão	-	20	40	40	75
média	-	40	80	80	150
média + desvio padrão	-	60	120	120	225

A texturização das ferramentas foi realizada na superfície de saída, empregando um sistema de laser de femtossegundos, caracterizado pela emissão de pulsos ultracurtos. O equipamento utilizado pertence ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN) e consiste em um laser de Ti:safira, modelo Element PRO 400, fabricado pela Femtolasers Produktions GmbH. Esse sistema opera em conjunto com o módulo de amplificação Femtopower Double 10 kHz, também fabricado pela mesma empresa, permitindo a obtenção das condições necessárias para o processo de texturização das superfícies das ferramentas de corte.

O feixe gerado pelo sistema apresenta polarização controlada, com comprimento de onda central de 800 nm, duração temporal de pulso de 30 fs, energia máxima por pulso de 200 μJ e frequência de repetição de 10 kHz. Durante a execução do processo, o feixe de laser é direcionado para uma estação de trabalho PRJ0221-Femtolasers, desenvolvida pela Laser Engineering Applications, responsável por conduzir o feixe óptico até o conjunto de focalização. Nesse arranjo experimental, a posição do foco permanece fixa, enquanto o deslocamento da amostra é realizado por um estágio de translação de três eixos da Aerotech, série ANT130, cuja precisão de posicionamento é da ordem de 10 nm. As trajetórias e estratégias de movimento são programadas por meio do software Mastercam 2025-Mill, utilizando um pós-processador específico adaptado ao sistema de usinagem a laser. Quando o feixe é focalizado por uma lente com distância focal de 20 mm, o diâmetro do ponto focal obtido é de aproximadamente 3,6 μm . Os principais parâmetros operacionais do sistema estão sintetizados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros típicos do laser de femtossegundos utilizados para a confecção das texturas no inserto.

Parâmetro	Valor
Largura do pulso	30 fs
Comprimento de onda	800 nm
Diâmetro do ponto focal	3,6 μm
Energia máxima do pulso	200 μJ
Taxa de repetição do pulso	10 kHz

Após a etapa de produção das texturas, foi realizada uma análise de perfilometria tridimensional, utilizando o software MountainsMap, com o objetivo de verificar as dimensões efetivamente obtidas e avaliar sua conformidade com os valores médios previamente definidos.

Essa análise permitiu verificar se os parâmetros geométricos produzidos (profundidade, largura e espaçamento entre as texturas) estavam dentro da faixa esperada, considerando os limites de precisão do processo de texturização a laser. Para a determinação da largura das texturas, adotou-se como critério a medição em uma região situada entre 15% e 20% da profundidade total, procedimento necessário devido ao arredondamento característico das bordas geradas durante o processo de fabricação.

Além da verificação dimensional, considerou-se a possível presença de detritos gerados durante o processo de texturização, conforme apontado por Zalloum et al. (2010) e Kononenko et al. (2016). Esses resíduos podem permanecer aderidos à superfície da ferramenta e interferir na geometria real das texturas. Para minimizar esse efeito, foi realizado um procedimento de limpeza mecânica, utilizando pasta de diamante com granulometria de 0,5 μm , aplicada por meio de escovação ao longo da direção dos canais texturizados, visando remover partículas residuais. Após esse processo de limpeza, as superfícies foram novamente inspecionadas em microscópio, e o procedimento foi repetido sempre que a presença de detritos ainda fosse identificada nas texturas.

3.5 Aplicação do Lubrificante Sólido nas Texturas

Conforme estudado na literatura, o uso de lubrificantes sólidos pode proporcionar melhorias relevantes na redução do atrito e das forças de corte durante operações de usinagem, como demonstrado nos estudos de Vignesh et al. (2020) e Dheeraj et al. (2020). De maneira geral, esses lubrificantes são aplicados na forma de camadas finas ou partículas em pó sobre a superfície de interesse. Na usinagem de materiais mais duros, o cavaco gerado normalmente não sofre deformação suficiente para alcançar o fundo das texturas presentes na ferramenta. Entretanto, conforme ocorre o desgaste progressivo da ferramenta, o cavaco passa a atingir regiões cada vez mais profundas dessas cavidades, possibilitando que o lubrificante armazenado nas texturas entre em contato com o fluxo de cavacos, atuando diretamente na interface de corte. Para evitar a liberação rápida do lubrificante, torna-se necessária a aplicação de um material selante, cuja função é manter o lubrificante retido no interior das texturas por um período maior. Dessa forma, além da esperada diminuição do coeficiente de atrito, busca-se também evitar o empastamento de cavacos no interior das cavidades. O comportamento esperado é que o material presente nas texturas acompanhe o escoamento do cavaco, em vez de permanecer aderido de maneira estática. Caso isso aconteça, o material retido poderá interagir com o

material da peça, produzindo um efeito semelhante ao de uma aresta postiça de corte, o que tende a alterar o atrito durante o processo de usinagem.

Preliminar à aplicação do lubrificante sólido, torna-se fundamental garantir que os canais das texturas estejam livres de detritos, visto que partículas remanescentes podem atuar como agentes abrasivos durante o processo de usinagem. Inicialmente, realizou-se um procedimento de escovação manual utilizando uma escova de microcerdas umedecidas com acetona, com o objetivo de remover possíveis resíduos. Entretanto, essa etapa não foi suficiente para eliminar completamente os detritos presentes nas cavidades. Dessa forma, foi realizada uma segunda etapa de limpeza por meio de escovação manual com pasta de polimento de diamante de granulometria 0,5 μm aplicada nas cerdas da escova, procedimento que se mostrou eficaz na remoção dos resíduos remanescentes.

Como lubrificante sólido, foi selecionado o dissulfeto de molibdênio (MoS_2) na forma de pó. O dissulfeto de molibdênio micronizado utilizado neste trabalho foi fabricado pela empresa ER do Brasil. As partículas desse material apresentam diâmetros de até 5 μm e espessura aproximada de 1 nm, dimensões adequadas para o preenchimento das cavidades das texturas produzidas. A aplicação do MoS_2 foi realizada inicialmente por meio de um pincel, distribuindo o pó diretamente sobre as texturas. Em seguida, foi aplicada uma mistura composta por selante e lubrificante, preparada de forma que o pó estivesse na maior concentração possível permitida pelo selante, garantindo a saturação das texturas e potencializando o efeito lubrificante desejado. A proporção escolhida foi de 20% de MoS_2 em silicone (em massa), a qual é relativamente alta e ainda permanece viável. Concentrações mais elevadas, como 30–40%, tendem a comprometer a elasticidade da matriz de silicone, aumentando o risco de trincas sob flexão mecânica contínua (Haseebuddin et al. 2025). Com base em dados de materiais compósitos semelhantes (matrizes de silicone com cargas de lubrificantes sólidos), esperava-se que uma concentração de 20% de MoS_2 gerasse uma redução no coeficiente de atrito em aproximadamente 40–60%, dependendo da qualidade da dispersão, o que corresponde a um coeficiente de atrito estimado de aproximadamente 0,3 (Haseebuddin et al. 2025). O selante utilizado foi o silicone OrbiVed337, material que apresenta resistência térmica de até 320 °C. Durante o procedimento, o excesso de selante foi removido cuidadosamente, evitando a formação de vazios nas cavidades texturizadas. A Figura 16 ilustra essa etapa do processo, incluindo uma ferramenta após a solidificação do selante e sem excesso significativo sobre a superfície. Ressalta-se que não foi necessário remover completamente o selante excedente, pois, de forma semelhante à tinta aplicada para ajuste da emissividade da superfície da ferramenta, a

presença residual de lubrificante e selante fora das texturas não interfere no processo, sendo removida naturalmente nos momentos iniciais da usinagem.

Por fim, a Figura 16 apresenta uma aresta de corte texturizada, cuja largura e profundidade são de 45 μm . Em (a), observa-se a textura sem qualquer preenchimento; em (b) as cavidades encontram-se preenchidas apenas com o lubrificante sólido; e em (c) é possível visualizar a textura com o lubrificante e o selante já solidificado, sem extravasamento significativo para fora das cavidades.

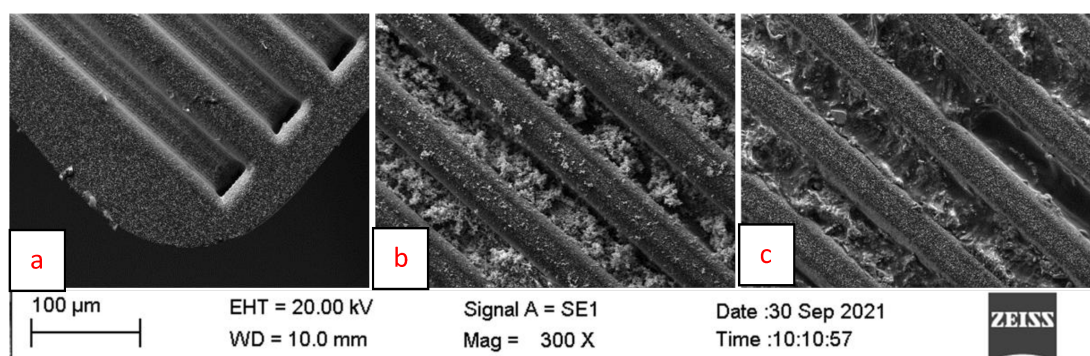


Figura 16 – Da esquerda para a direita, tem-se a sequência de aplicação do lubrificante na textura. Primeiramente tem-se a textura vazia (a), depois preenchida com MoS_2 (b) e por último com a mistura de selante com o lubrificante (c).

3.6 Experimentos

Para todos os ensaios realizados nesta tese, independentemente da categoria experimental, adotou-se inicialmente a execução em duplicata, sendo a realização de uma terceira repetição condicionada à ocorrência de discrepâncias significativas entre os dois primeiros resultados obtidos. Como critério de avaliação da estabilidade experimental, estabeleceu-se que coeficientes de variação inferiores a 20% indicariam dispersão estatística suficientemente baixa, garantindo assim a validação dos dados, descartando-se, portanto, a necessidade de réplicas adicionais (Gomes, 2009). A adoção desse procedimento fundamenta-se na utilização do coeficiente de variação como parâmetro de avaliação da reprodutibilidade experimental, permitindo analisar a relação entre a dispersão dos resultados e a média amostral. Assim, valores inferiores ao limite estabelecido foram considerados indicativos de estabilidade adequada dos ensaios, assegurando confiabilidade aos resultados obtidos e, simultaneamente, otimização do número de repetições experimentais, do tempo de ensaio e do consumo de materiais. As ANOVAS apresentadas foram calculadas com auxílio do software Statística.

3.6.1 Parâmetros de corte no Torneamento

Devido à baixa condutividade térmica e à elevada reatividade química da liga Ti6Al4V, grande parte do calor gerado durante a usinagem concentra-se na região de corte, favorecendo a adesão do material à ferramenta e acelerando seu desgaste. Por essa razão, os ensaios foram realizados com aplicação abundante do fluido de corte Vasco 7000, da Blaser Swissslube, na concentração de 7%, com vazão de 10 L/min e pressão de 1,2 bar, visando melhorar a refrigeração e a lubrificação da interface ferramenta–cavaco, além de auxiliar na remoção dos cavacos.

Para a definição dos parâmetros de corte utilizados nos ensaios de torneamento da liga Ti6Al4V, foi realizada uma análise da literatura com o objetivo de identificar as condições de usinagem mais frequentemente empregadas em estudos experimentais envolvendo esse material.

Para manter a coerência metodológica do trabalho, essa análise foi realizada com base nos mesmos artigos discutidos na Seção 3.4, os quais investigam o torneamento da liga Ti6Al4V utilizando ferramentas texturizadas com texturas do tipo sulco (*groove*). Esses estudos foram utilizados como referência tanto para a definição das geometrias das texturas quanto para a seleção das condições de usinagem, permitindo alinhar os parâmetros experimentais deste trabalho com aqueles já explorados na literatura.

A partir da avaliação dos valores de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte reportados nesses estudos, observou-se que muitos trabalhos utilizam faixas semelhantes de parâmetros, geralmente escolhidas de modo a representar condições típicas de usinagem sem provocar desgaste excessivamente acelerado da ferramenta. Além disso, tais condições favorecem a formação característica de cavacos segmentados, comum na usinagem de ligas de titânio, aspecto importante para a análise da interação tribológica entre cavaco e ferramenta.

Com base nesse levantamento, foi definido um conjunto representativo de parâmetros de corte, estabelecido a partir de valores médios observados nos estudos analisados. Sempre que possível, esses valores foram arredondados para facilitar a configuração experimental e a padronização dos ensaios de torneamento. Os parâmetros registrados (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte), foram uma base para guiar o experimento e uma comparação direta do desempenho entre as diferentes ferramentas texturizadas. Os valores estudados para essas condições de usinagem são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de corte em artigos revisados sobre o torneamento de Ti6Al4V com ferramenta texturizada. Média e desvio-padrão apresentados foram arredondados.

Artigos que estudaram torneamento de Ti6Al4V com ferramenta texturizada	Parâmetro de Corte no Torneamento		
	Velocidade (m/min)	Avanço (mm/rev)	Profundidade (mm)
Su et al. (2018)	16-175	0,2	2
Su et al. (2017)	16-125	0,2	2
Li et al. (2017)	50	0,3	2
Liu et al. (2019)	50-100	0,05	1
Patel et al. (2020)	90	0,3	2
Hosokawa et al, 2022	50-250	0,1	0,5
Siju et al. (2022)	50-150	0,33	1
Fouathiya et al. (2021)	40-200	0,1	0,3
Siju e Waigaonkar (2021)	73	0,3	1
Zhang et al. (2023)	75	0,1	0,1
Uhlmann e Schröter (2020)	50-100	0,15	0,5
Uhlmann e Schröter (2021)	100	0,15	0,5
Uhlmann et al. (2022)	100	0,15	0,5
Fernández-Lucio et al. (2021)	150	0,05	0,25
Zhang et al. (2020)	22-90	0,2	0,3
Li et al. (2022)	70-111	0,2	0,5
média -desvio padrão	45	0,1	0,5
média	85	0,2	1
média + desvio padrão	125	0,3	1,5

3.6.2 Análise de Força

A obtenção das forças de usinagem durante o torneamento foi realizada utilizando o dinamômetro piezoelétrico Kistler 9265B, Figura 17. Esse equipamento opera com base no efeito piezoelétrico, no qual cristais sensíveis convertem deformações mecânicas, geradas pelas forças atuantes durante o processo de usinagem, em sinais elétricos proporcionais à magnitude dessas forças. Para o condicionamento do sinal proveniente do dinamômetro, foi utilizado o amplificador de carga Kistler 5019A, responsável por converter e amplificar os sinais elétricos gerados pelos sensores piezoelétricos, tornando-os adequados para aquisição e processamento.



Figura 17 – Dinamômetro Kistler 9265B contendo o suporte que por sua vez contém a ferramenta de corte, para o torneamento da barra de Ti6Al4V. Também é possível ver a mangueira do fluido de corte, o qual jorrou o fluido Vasco7000 durante todo o torneamento, e as marcações na barra para diferentes testes.

A digitalização e o registro dos sinais foram realizados por meio de uma placa de aquisição de dados NI PCI-6036E, da National Instruments, permitindo o armazenamento e posterior análise das informações obtidas durante os ensaios de torneamento.

Durante os experimentos, foram registradas as três componentes das forças de usinagem: força de corte (F_c), correspondente à componente tangencial responsável pela remoção de material; força de avanço (F_f), associada ao movimento de avanço da ferramenta; e força passiva (F_p), também denominada força radial, que atua perpendicularmente ao plano de trabalho. A aquisição dos sinais foi realizada com taxa de amostragem de 1000 Hz, durante

um intervalo de 10 segundos para cada ensaio, resultando na coleta de 10.000 pontos de dados para cada componente de força. Esses dados foram posteriormente utilizados para a análise do comportamento das forças ao longo do processo de usinagem, considerando sempre a força de usinagem, F_u , que representa a soma vetorial das três componentes F_c , F_f e F_p .

3.6.3 Análise da Rugosidade da Peça Usinada

As medições de rugosidade foram realizadas utilizando um rugosímetro SJ-201, fabricado pela Mitutoyo, com o objetivo de avaliar a qualidade da superfície gerada após os ensaios de torneamento, Figura 18. Para cada condição experimental, foram efetuadas três medições ao longo da superfície usinada, posicionadas a intervalos angulares de aproximadamente 120° , obtidos por meio da rotação da barra entre cada medição. Esse procedimento foi adotado para garantir uma amostragem mais representativa da superfície, minimizando a influência de possíveis variações locais no acabamento superficial.

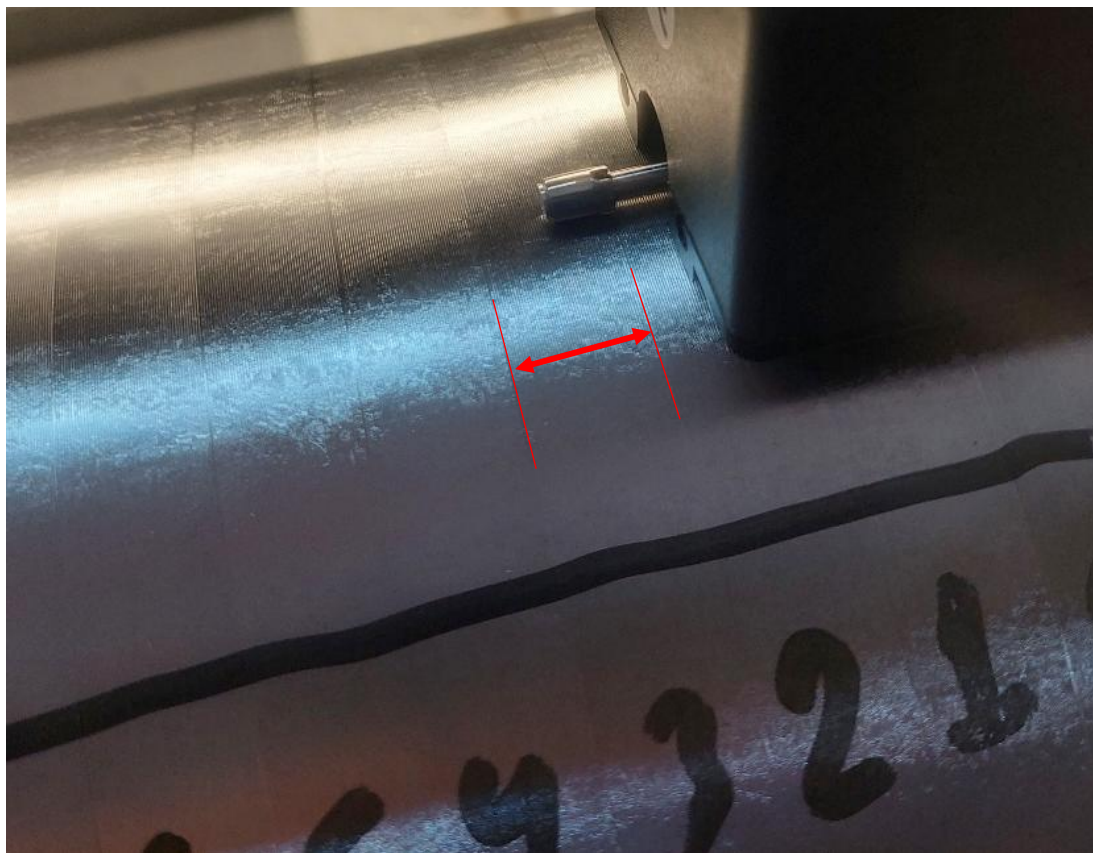


Figura 18 – Medição da rugosidade da peça. Na superfície é possível identificar os trechos que foram torneados sob diferentes condições. A direção do apalpador é a mesma do avanço no torneamento.

Durante as medições, foi utilizado filtro gaussiano com cut-off de 0,8 mm, valor amplamente empregado em análises de rugosidade para superfícies usinadas por torneamento. O comprimento de avaliação (L_m) adotado foi de 4 mm, enquanto o campo de medição considerado foi de 100 μm , permitindo capturar adequadamente as irregularidades características da topografia superficial gerada no processo.

A análise dos perfis obtidos concentrou-se nos parâmetros de rugosidade R_a (rugosidade média aritmética), R_q (rugosidade média quadrática) e R_z (altura máxima média do perfil), os quais são amplamente utilizados na caracterização do acabamento superficial em processos de usinagem. Para o processamento dos perfis, utilizou-se um filtro gaussiano com *cut-off* de 0,8 mm, destinado a separar as componentes de rugosidade e ondulação da superfície. O comprimento de avaliação foi de 4 mm, correspondente a cinco comprimentos de amostragem, e o campo vertical de medição foi de 100 μm . Os dados foram processados no software SJ Tools, da Mitutoyo.

3.6.4 Análise da Vida da Ferramenta de Corte

Para a medição do desgaste das ferramentas de corte foi utilizado um estereomicroscópio óptico Olympus SZ61. Com o objetivo de padronizar o posicionamento das ferramentas durante as medições e reduzir o tempo necessário para a realização das análises, foi desenvolvido um suporte específico fabricado em PLA por meio de manufatura aditiva. Esse suporte permitiu posicionar as ferramentas sempre na mesma orientação em relação ao microscópio, garantindo maior agilidade e repetibilidade nas medições do desgaste.

De acordo com a Norma ISO 3685 (1993), o critério convencional de fim de vida da ferramenta é definido por um desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) de 0,6 mm. No presente trabalho, optou-se pela adoção de um critério correspondente à metade desse valor, tendo sido estabelecido em $VB_{Bmáx} = 0,3$ mm como limite para interrupção dos ensaios. Essa escolha foi realizada com o objetivo de reduzir o consumo de material e o tempo experimental, considerando o elevado custo e a natureza nobre do material utilizado nos testes. Durante cada ensaio foram realizadas, no mínimo, três interrupções do processo de usinagem para a medição do desgaste da ferramenta. O intervalo entre essas paradas variou conforme a condição de corte e a evolução do desgaste, de modo a permitir a construção adequada da curva de vida da ferramenta.

Quando o desgaste de flanco ultrapassou o valor limite de 0,3 mm, foi realizada uma interpolação linear para determinar com maior precisão o comprimento usinado correspondente ao fim de vida da aresta de corte (L_{fv}), conforme apresentado na Equação 1. Para esse cálculo foram utilizados o comprimento usinado no ponto que ultrapassou o fim de vida (L_i) e o desgaste de flanco nesse ponto (DF_i), além do ponto anterior a este (L_{i-1}) e o seu respectivo desgaste de flanco (DF_{i-1}), através do programa Microsoft Excel. Obedecendo a norma ISO 3685 (1993). Posteriormente, o valor final da vida de todas as arestas foi convertido em volume de material removido (VMR), Equação 2. Essa conversão permite comparar de forma mais representativa o desempenho das ferramentas, uma vez que considera diretamente o volume total de material efetivamente usinado até o término da vida útil.

$$L_{fv} = L_{i-1} + (L_i - L_{i-1}) * \left(\frac{0,3 - DF_{i-1}}{DF_i - DF_{i-1}} \right) \quad (1)$$

$$VMR = \frac{\pi}{4000} * L * (D_i^2 - D_f^2) \quad (2)$$

Onde:

- L_{fv} (mm) = percurso de avanço de fim de vida
- L_i (mm) = percurso de avanço após exceder desgaste de flanco de 0,3 mm
- L_{i-1} (mm) = percurso de avanço antes de exceder desgaste de flanco de 0,3 mm
- DF_i (mm) = desgaste de flanco após exceder 0,3 mm
- DF_{i-1} (mm) = desgaste de flanco antes de exceder 0,3 mm
- VMR (cm³) = volume de material removido total no fim de vida
- L (mm) = percurso do trecho
- D_i (mm) = diâmetro inicial
- D_f (mm) = diâmetro final

3.6.5 Análise Metalográfica e Microdureza da peça e dos Cavacos

A caracterização metalográfica foi realizada tanto no material da barra de Ti6Al4V quanto nos cavacos gerados durante o processo de torneamento, com o objetivo de investigar possíveis alterações microestruturais associadas às diferentes condições de corte e às texturas presentes nas ferramentas. Além da observação microestrutural, também foram realizados ensaios de microdureza, permitindo correlacionar as características da microestrutura com possíveis variações de propriedades mecânicas resultantes da deformação plástica intensa sofrida durante a formação do cavaco. Essas análises foram conduzidas tanto no material base

quanto nos cavacos provenientes de cada condição experimental, possibilitando uma comparação entre os diferentes tipos de textura estudados.

Inicialmente, as amostras do material e dos cavacos foram preparadas por meio de procedimentos convencionais de preparação metalográfica. O processo teve início com o embutimento e lixamento progressivo, utilizando lixas abrasivas de granulometrias sucessivamente mais finas, com o objetivo de remover irregularidades superficiais e produzir uma superfície plana e homogênea. Em seguida, realizou-se a etapa de polimento, normalmente com pastas diamantadas de granulometria reduzida, até a obtenção de uma superfície espelhada, condição necessária para a adequada revelação da microestrutura do material, Figura 19. Em (a) aparece uma amostra embutida em acrílico. No interior do acrílico é possível ver um preenchimento de alumínio, essencial para dar condutividade elétrica à amostra durante a análise no microscópio MEV. A superfície superior (com duas marcações circulares com caneta de cor laranja), corresponde a um plano perpendicular ao plano de seção circular da barra, ou seção longitudinal. Já a outra superfície exposta da amostra (frontal), corresponde a um plano paralelo ao plano de seção circular da barra, ou seção transversal. Em (b), a região mais opaca em cinza claro, e menos reflexiva, corresponde à região que foi quimicamente atacada por HF. O ataque químico das amostras foi realizado de forma localizada, com aplicação controlada do reagente por meio de pipeta, sem imersão total das amostras, durante 10 segundos. Essa metodologia foi adotada devido à elevada periculosidade do ácido fluorídrico (HF), bem como à sua limitada disponibilidade comercial no Brasil, em razão das rigorosas regulamentações relacionadas ao armazenamento, transporte, comercialização e manipulação desse reagente. O HF é classificado como uma substância altamente tóxica e corrosiva, apresentando riscos severos à saúde mesmo em baixas concentrações, incluindo elevada capacidade de penetração tecidual e potencial de causar intoxicação sistêmica. Dessa forma, a aplicação pontual via pipeta permitiu reduzir significativamente o consumo do reagente, minimizar riscos operacionais durante os ensaios e manter controle adequado da ação do ataque químico sobre a superfície analisada. Dentro desta região onde o HF foi aplicado, há 2 duas marcações circulares com caneta de cor laranja, que são referências para regiões para análise no MEV e posteriormente indentação no ensaio de microdureza.

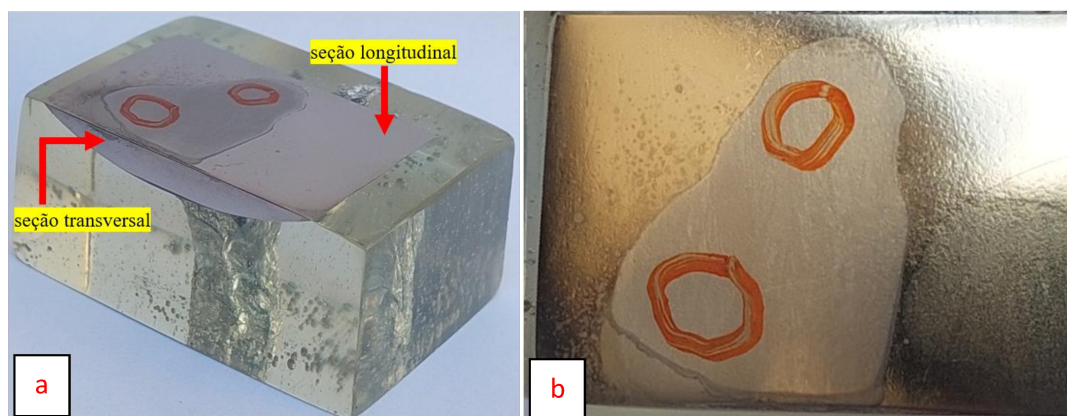


Figura 19 – Amostras da seção transversal e longitudinal da barra de Ti6Al4V montada em acrílico para análise microscópica.

Após o polimento, foi realizado o ataque químico para evidenciar os contornos de grão e as diferentes fases presentes na liga. Para a liga Ti6Al4V, um dos reagentes utilizados é o ácido fluorídrico, geralmente aplicado em solução apropriada para reagir seletivamente com a superfície do titânio e revelar sua microestrutura característica composta pelas fases α e β . O ataque químico foi realizado de forma controlada, com curto tempo de exposição, seguido de lavagem e secagem da amostra, evitando assim ataques excessivos que poderiam prejudicar a observação da microestrutura.

Após a preparação metalográfica, as amostras foram analisadas, inicialmente em um estereomicroscópio Olympus SZ6145TR, permitindo a observação preliminar da microestrutura e da morfologia dos cavacos gerados. Para análises com maior ampliação e resolução, especialmente para avaliar detalhes da zona de cisalhamento e mecanismos de fratura nos cavacos, também foram realizadas observações por microscopia eletrônica de varredura, utilizando o MEV Zeiss EVO MA10. Esse equipamento possibilita analisar com maior precisão aspectos como morfologia do cavaco, presença de bandas de cisalhamento adiabático, tipo de fratura e raio de curvatura dos cavacos.

Complementarmente à análise microestrutural, foram realizados ensaios de microdureza Vickers utilizando o microdurômetro Shimadzu HMV-2, Figura 20. Esses ensaios foram aplicados tanto no material da barra quanto nos cavacos. A carga aplicada foi de 490 mN (HV 0,05) por um tempo de 15 segundos, com 3 indentações para cada condição avaliada. A avaliação da microdureza permitiu identificar possíveis endurecimentos por deformação decorrentes do processo de usinagem, contribuindo para a interpretação das transformações microestruturais observadas e para a compreensão da influência das texturas da ferramenta na formação e no comportamento dos cavacos.



Figura 20 – Ensaio de microdureza Vickers utilizando o Shimadzu HMV-2, para uma amostra de cavaco. A amostra de cavaco encontra-se em um corpo de resina, a qual permite que o indentador penetre na região lateral do cavaco.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa são apresentados e discutidos de forma estruturada, seguindo a mesma lógica evolutiva adotada no planejamento metodológico. Para facilitar a compreensão do desenvolvimento do estudo, esta seção foi organizada em três etapas principais de análise, correspondentes às fases experimentais descritas anteriormente na metodologia. Logo, a conclusão de uma etapa define a metodologia a ser executada na etapa seguinte.

Na Etapa 1, foram avaliadas diferentes geometrias iniciais de texturas aplicadas à superfície de saída de ferramentas de corte utilizadas no torneamento da liga Ti6Al4V. As dimensões e configurações das texturas foram definidas com base em valores médios encontrados na literatura, permitindo estabelecer um conjunto inicial de condições experimentais representativas do estado da arte. O objetivo dessa etapa foi investigar, de forma exploratória, a influência de diferentes parâmetros geométricos da textura (como direção, profundidade e distância em relação à aresta de corte), bem como do avanço, sobre variáveis de resposta, como forças de usinagem e rugosidade da peça.

A partir dos resultados obtidos na primeira etapa (de força e rugosidade), foi possível identificar as variáveis geométricas de textura mais influentes no processo de usinagem. Com base nessas informações, a Etapa 2 foi estruturada utilizando um Planejamento Composto Central (PCC) com foco nas mesmas variáveis estudadas na Etapa 1, permitindo a modelagem estatística do processo por meio da metodologia de superfícies de resposta (MSR). Essa abordagem possibilitou avaliar de forma mais detalhada a influência da interação entre as variáveis selecionadas e determinar combinações de parâmetros geométricos que conduzissem à otimização das respostas analisadas.

Por fim, na Etapa 3, a geometria de textura considerada ótima foi validada experimentalmente. Nessa etapa, foram realizados testes comparativos entre ferramentas texturizadas e ferramentas convencionais sem textura, investigando também o efeito da velocidade de corte e da aplicação de lubrificante sólido de MoS₂ nas texturas, sob condição de lubrificação com fluido de corte em abundância. Além das variáveis anteriormente analisadas (força e rugosidade), nesta etapa também foi avaliada a vida da ferramenta, permitindo quantificar os ganhos efetivos proporcionados pela aplicação da textura.

4.1 Etapa 1

A primeira etapa experimental teve como objetivo avaliar, de forma exploratória, a influência de diferentes geometrias de textura aplicadas à superfície de saída das ferramentas de corte no torneamento da liga Ti6Al4V. Nessa fase inicial, buscou-se compreender o comportamento do processo de usinagem frente a variações geométricas das texturas, bem como identificar quais parâmetros apresentariam maior influência sobre as variáveis de resposta analisadas.

4.1.1 Planejamento da Etapa 1

As geometrias de textura utilizadas nesta etapa foram definidas com base em valores médios encontrados na literatura especializada (rever Seção 3.4 e Subseção 3.6.1), conforme discutido na revisão bibliográfica. Essa estratégia permitiu que os testes iniciais fossem conduzidos a partir de parâmetros representativos do estado da arte, reduzindo a possibilidade de adoção de geometrias pouco realistas ou distantes das condições previamente investigadas por outros pesquisadores.

Foram avaliadas oito configurações distintas de textura, obtidas a partir da combinação das variáveis geométricas consideradas mais relevantes segundo a literatura: direção das ranhuras em relação à aresta principal de corte (paralela ou perpendicular), profundidade da textura e distância entre o início da textura e a aresta de corte. Além disso, foram utilizados dois valores distintos de avanço de usinagem, com o objetivo de investigar o efeito da variação do comprimento de contato cavaco-ferramenta sobre o desempenho das texturas. A combinação dessas variáveis foi estruturada por meio de um planejamento fatorial completo do tipo 2^4 , com réplica e tréplica dos experimentos, conforme apresentado no Quadro 4.

O Quadro 4 corresponde a uma versão operacional do planejamento apresentado anteriormente no Quadro 1 (Subseção 3.2.2), porém já contendo os níveis definidos para a realização dos ensaios experimentais. Esses níveis foram estabelecidos a partir de uma estimativa inicial fundamentada nos parâmetros geométricos reportados na literatura para ferramentas texturizadas utilizadas na usinagem da liga Ti6Al4V. Os intervalos adotados foram definidos com base nos valores mais recorrentes identificados nos estudos revisados, previamente apresentados na Tabela 4 e na Tabela 6, que sintetizam os parâmetros geométricos e condições de usinagem reportados por diferentes autores.

ETAPA 1: Fatorial Completo 2 ⁴					
Variáveis de Saída: Força e Rugosidade					
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
Testes Extras					
1.TE1	sem textura	sem textura	sem textura	sem textura	0,1
1.TE2	sem textura	sem textura	sem textura	sem textura	0,3

Quadro 4 – Ensaio de torneamento da Etapa 1

Na Etapa 1, os ensaios de torneamento foram realizados utilizando parâmetros de corte mantidos constantes, de forma a garantir condições comparáveis entre todas as configurações de ferramentas analisadas. A profundidade de corte (ap) foi fixada em 1 mm e a velocidade de corte (Vc) foi definida em 70 m/min. Já o avanço por revolução (f) foi investigado em dois níveis distintos, sendo 0,1 mm/rev e 0,3 mm/rev. A escolha desses parâmetros buscou representar condições típicas de usinagem da liga Ti6Al4V, permitindo avaliar o efeito das diferentes texturas da ferramenta tanto em condições de avanço mais baixo, associadas a operações de acabamento, quanto em condições de avanço mais elevado, mais próximas de operações de desbaste e maior taxa de remoção de material.

4.1.2 Texturas Produzidas na Etapa 1

Na Figura 21 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: número do tipo de textura, ângulo dos canais em relação à aresta principal de corte, distância do início da primeira textura até a aresta principal de corte (em μm), profundidade da ranhura da textura (em μm), largura da textura (em μm) e espaçamento 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.

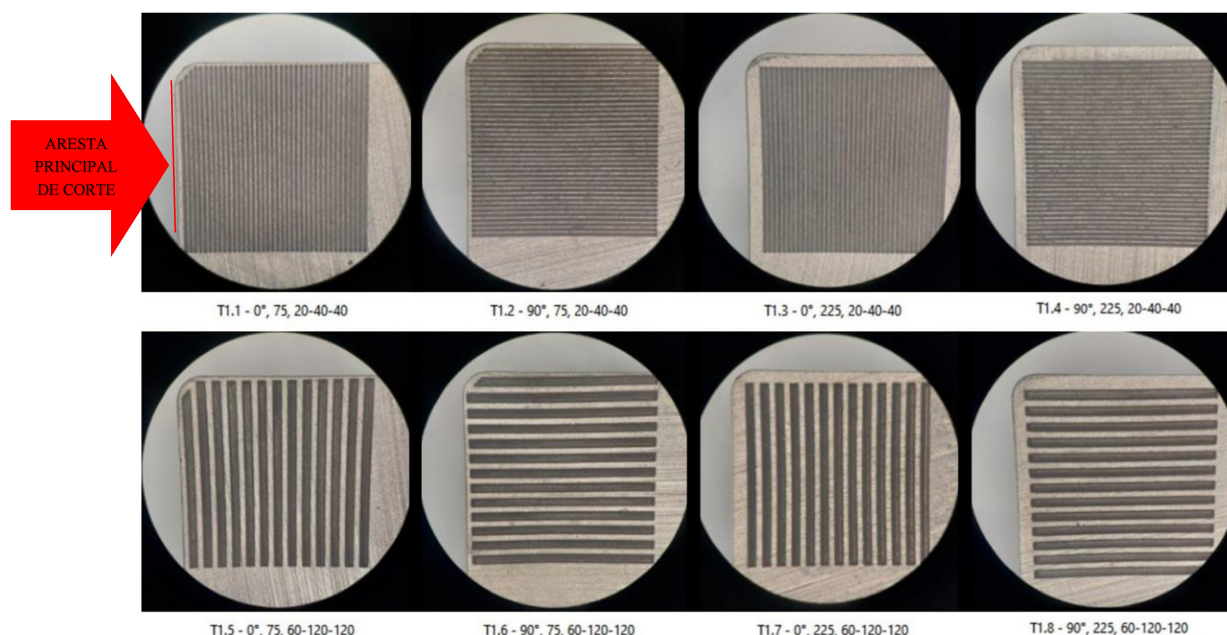


Figura 21 – Imagens dos 8 tipos de texturas, com os valores de suas variáveis: direção da ranhura, distância da aresta de corte, profundidade, largura e espaçamento (em μm). A seta vermelha na textura “T1.1” identifica a aresta principal de corte.

O uso de lasers de femtossegundos foi crucial para a obtenção de texturas livres de defeitos. A precisão no controle geométrico das texturas permitiu uma avaliação confiável de sua influência, sem interferências causadas por falhas no processo de texturização.

A Figura 22 ilustra a aresta de corte de uma ferramenta texturizada, neste caso correspondente à condição T1.7. Observa-se que as texturas ocupam uma área quadrada de 9 mm². A imagem também destaca algumas referências utilizadas para a determinação dos

parâmetros geométricos da textura do tipo ranhura. A linha “A” indica a aresta principal de corte, enquanto a linha “B” representa a direção da ranhura da textura. No exemplo apresentado, as linhas “A” e “B” são paralelas, ou seja, o ângulo entre elas é 0° . Dessa forma, o parâmetro “Direção” da textura também é igual a 0° neste caso. Esse parâmetro de direção é, por vezes, citado na literatura tomando como referência a direção do escoamento do cavaco (neste caso seria perpendicular à direção de escoamento do cavaco); entretanto, no presente trabalho, optou-se por utilizar a aresta principal de corte como referência geométrica.

Ainda na Figura 22, observa-se a distância “C” entre as linhas “A” e “B”. Essa distância corresponde ao parâmetro “Distância da Aresta de Corte”, que define o ponto inicial da primeira textura. Esse parâmetro é essencial, pois valores muito elevados podem fazer com que o cavaco tenha pouco contato com a superfície texturizada, resultando em efeito reduzido ou até inexistente da textura durante o corte. Por outro lado, valores muito baixos podem comprometer a resistência mecânica da ferramenta, favorecendo o surgimento de trincas nas texturas nos momentos iniciais do corte, uma vez que essas trincas podem atuar como concentradores de tensão.

As dimensões da textura podem ser observadas nas distâncias “D” e “E”, que correspondem, respectivamente, à largura e ao espaçamento das ranhuras. Esses dois parâmetros possuem o mesmo valor e são numericamente iguais ao dobro da profundidade da textura. As dimensões de largura e profundidade podem influenciar diretamente os mecanismos de atuação da textura, variando entre efeitos como redução da área de contato cavaco–ferramenta, efeitos de adesão, ancoragem e retenção de detritos. Já o valor do espaçamento influencia a intensidade com que esses efeitos se manifestam durante o processo de usinagem.

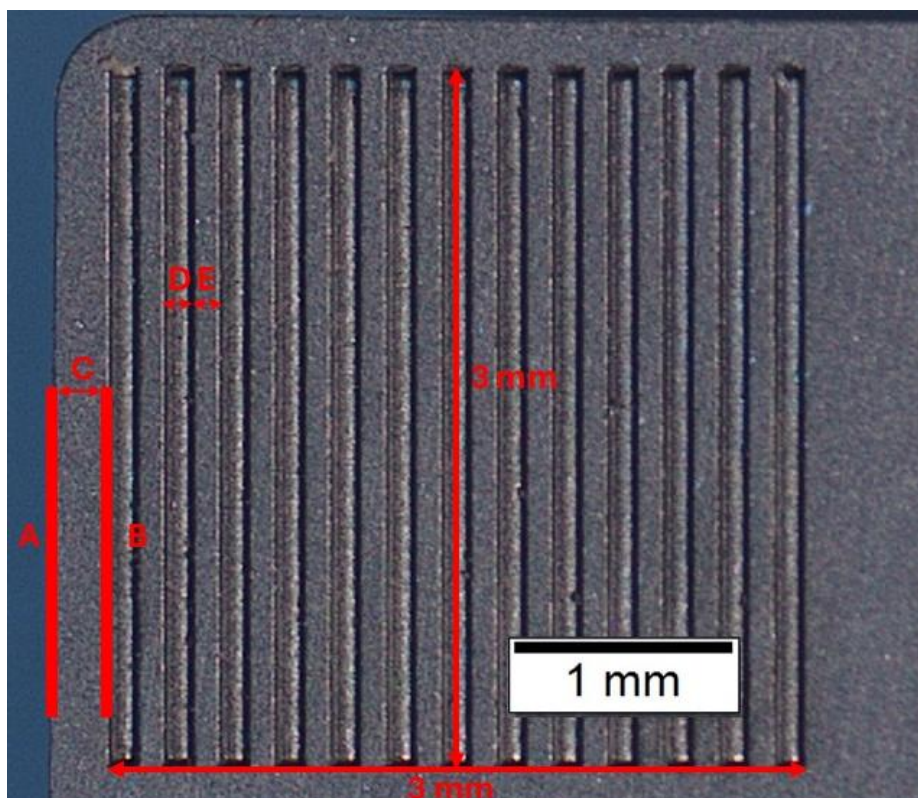


Figura 22 – Imagem da superfície de saída de uma ferramenta texturizada (neste caso, condição T1.7). A imagem destaca algumas referências utilizadas para determinar os parâmetros geométricos da textura do tipo ranhura.

Durante os experimentos foram analisadas como variáveis de saída, as componentes da força de usinagem e a rugosidade das superfícies usinadas. A análise conjunta desses resultados permitiu compreender não apenas o impacto das texturas no comportamento mecânico do processo de corte, mas também suas possíveis influências nos mecanismos tribológicos envolvidos na interface cavaco-ferramenta, cujas condições afetam a qualidade da peça usinada. Com a finalidade de permitir comparações diretas, ferramentas convencionais (lisas ou sem textura) foram testadas nas mesmas condições de corte das texturizadas. Para cada condição avaliada foi realizada medições, a fim de gerar dados suficientes para o cálculo dos valores médios dos parâmetros analisados. A força de usinagem foi considerada como a principal variável de saída do estudo.

A partir desses valores medidos, a força de usinagem foi calculada como a resultante das três forças registradas. Esse cálculo foi realizado por meio da soma dos quadrados de cada componente de força, seguida da extração da raiz quadrada do resultado. A força de usinagem é a variável analisada neste estudo, desempenhando papel fundamental na avaliação do comportamento do processo e dos esforços mecânicos envolvidos na operação.

4.1.3 Resultados de Força da Etapa 1

A Figura 23 apresenta os resultados das forças de usinagem para um avanço de 0,1 mm/rev, comparando os oito tipos de textura analisados. A linha laranja representa o valor obtido para a ferramenta não texturizada (lisa), servindo como referência para a análise do impacto das texturas na usinagem. Barras vermelhas indicam texturas que resultaram em aumento da força média de usinagem em comparação com a ferramenta lisa, enquanto barras verdes representam texturas que promoveram redução na força média de usinagem. Observa-se que algumas texturas resultaram em forças de usinagem menores em relação à ferramenta lisa (cinco das oito texturas), sugerindo um efeito benéfico da texturização na interface ferramenta–cavaco. Por outro lado, algumas texturas apresentaram desempenho inferior, com valores de força superiores aos da ferramenta lisa, o que pode estar associado a um efeito negativo na lubrificação ou na estabilidade do contato ferramenta–cavaco. Barras de erro relativamente elevadas em algumas texturas indicam maior variabilidade nos dados, o que será analisado em estudos futuros para uma melhor compreensão dos fatores envolvidos. É importante enfatizar que esse comportamento sustenta diretamente uma das principais lacunas identificadas na literatura: apesar da ampla discussão sobre texturas, a maioria dos autores ainda apresenta apenas intervalos dimensionais em vez de geometrias suportadas estatisticamente. Ao estabelecer a significância dos parâmetros, este trabalho avança na definição de configurações ótimas de textura, em vez de apenas intervalos genéricos.

As barras de erro relativamente elevadas observadas em algumas condições texturizadas indicam maior variabilidade nas forças de usinagem. Essas maiores variações estiveram predominantemente associadas a configurações de textura que resultaram em forças médias superiores às da ferramenta lisa, nas quais foram observadas vibrações durante a usinagem, sugerindo uma interação instável entre cavaco e ferramenta. Tal instabilidade pode estar relacionada ao contato intermitente, obstrução das ranhuras ou flutuações na eficiência da lubrificação.

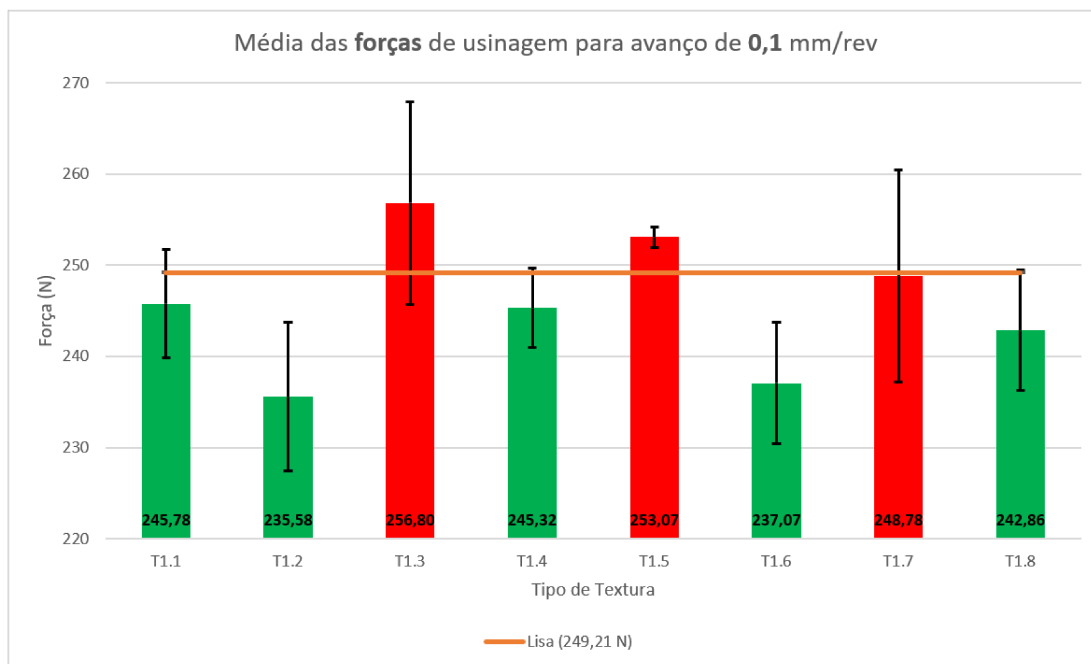


Figura 23 – Forças médias de usinagem para um avanço de 0,1 mm/rev.

A análise dos resultados evidencia uma tendência relevante relacionada à orientação das texturas em relação à aresta principal da ferramenta. Observa-se que as texturas T1.2 e T1.6 apresentaram as menores forças médias de usinagem dentre todas as condições avaliadas (e são texturas do tipo com menor distância da aresta de corte), indicando maior eficiência na redução do esforço de corte. Essas duas configurações possuem texturas orientadas perpendicularmente à aresta principal da ferramenta, sugerindo que essa geometria favorece o escoamento do cavaco e melhora as condições tribológicas na interface ferramenta–cavaco, possivelmente contribuindo para maior contato do fluido lubrificante e redução da área efetiva de contato. Entre elas, destacam-se especialmente as texturas T1.2 e T1.6 (que são texturas do tipo com menor distância da aresta de corte), que apresentaram os menores valores médios de força, reforçando a influência positiva dessa orientação geométrica sobre o desempenho da usinagem. Em contrapartida, as texturas T1.1, T1.3, T1.5 e T1.7, caracterizadas por orientação paralela à aresta principal da ferramenta, apresentaram comportamento menos favorável de maneira geral. A textura T1.3 foi a que resultou no maior aumento da força média de usinagem em relação à ferramenta lisa, seguida pela T1.5, indicando que determinadas configurações paralelas podem dificultar o escoamento do cavaco ou comprometer a estabilidade do contato tribológico durante o corte. Já a textura T1.7 apresentou comportamento intermediário, com valor médio muito próximo ao da ferramenta lisa, sugerindo efeito praticamente neutro sobre as forças de usinagem. Esses resultados indicam que, além das dimensões da textura, a orientação

geométrica das ranhuras exerce influência significativa no desempenho da ferramenta, afetando diretamente os mecanismos de contato, atrito e remoção de material durante a usinagem.

A Figura 24 apresenta os resultados das forças de usinagem para um avanço de 0,3 mm/rev. Mais uma vez, as barras vermelhas representam texturas que resultaram em forças superiores às da ferramenta lisa, enquanto as barras verdes representam aquelas que reduziram as forças de usinagem. Diferentemente do comportamento observado para 0,1 mm/rev, em que as texturas perpendiculares à aresta de corte apresentaram os melhores resultados, nesse avanço mais elevado a tendência foi invertida, onde em duas ocasiões as texturas paralelas à aresta principal da ferramenta apresentaram médias de força de usinagem superiores à média da ferramenta lisa. No maior avanço, texturas posicionadas a maiores distâncias da aresta principal de corte (T1.3, T1.4, T1.7 e T1.8) resultaram em menores forças de usinagem. Isso sugere que a interação entre o cavaco e a superfície texturizada pode ser influenciada de maneira distinta em função do avanço aplicado, impactando diretamente a eficiência da remoção de material e a estabilidade do processo. Esse comportamento pode indicar que diferentes operações de usinagem, como desbaste ou acabamento, podem requerer configurações distintas de textura.

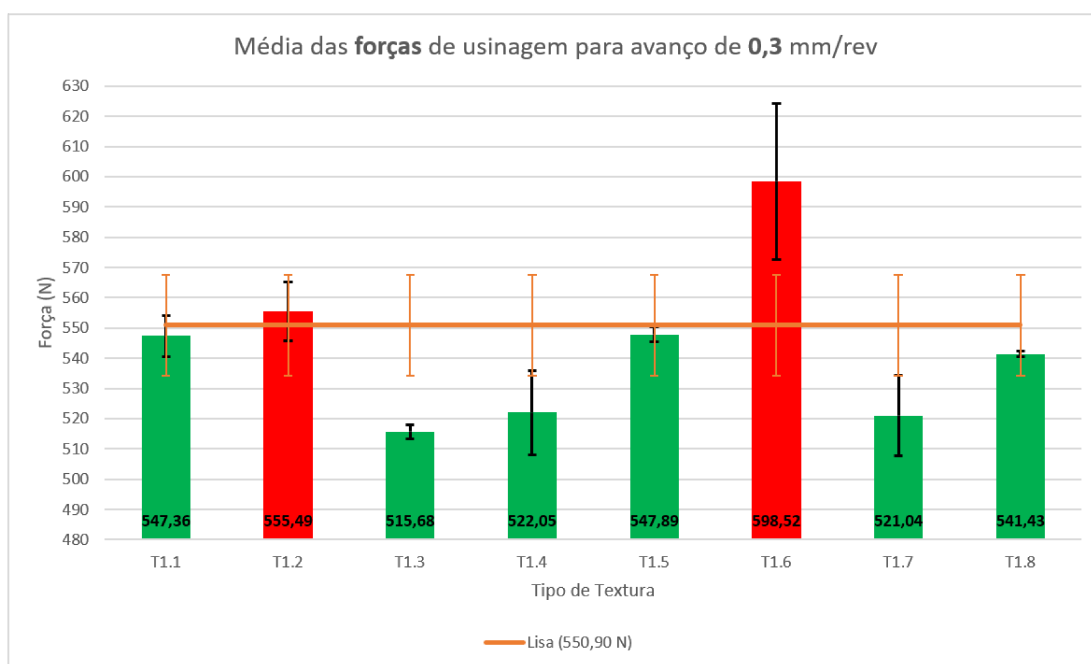


Figura 24 – Forças médias de usinagem para um avanço de 0,3 mm/rev.

As variações observadas reforçam a necessidade de estudos adicionais sobre a interação entre diferentes parâmetros de textura e condições de corte, a fim de compreender melhor os mecanismos envolvidos e aprimorar as geometrias texturizadas.

Existem situações em que texturas perpendiculares reduziram a força de usinagem em avanços mais baixos, mas pioraram o desempenho em avanços mais elevados (são os casos da T1.2 e T1.6), enquanto texturas paralelas apresentaram o efeito oposto (são os casos da T1.3, T1.5 e T1.7). Isso provavelmente indica que o mecanismo de interação da textura muda com o avanço. Em avanços menores, uma textura perpendicular à aresta de corte facilita o escoamento do cavaco, mas em avanços mais altos, provavelmente esse fluxo acaba obstruindo os canais, aumentando o atrito entre a superfície da ferramenta e corte e do cavaco. Por outro lado, uma textura paralela dificulta o escoamento do cavaco em avanços baixos, mas em avanços elevados ela não atua como uma barreira ao fluxo do cavaco. Em vez disso, reduz a área de contato, favorecendo a redução das forças. Como esperado de acordo com estudos de revisão anteriores, como no trabalho de Machado et al (2021), a influência das ranhuras é governada pelos mecanismos de interação cavaco-ferramenta: em avanços menores, as texturas podem reduzir a área real de contato e guiar o fluxo do cavaco, enquanto em avanços maiores o aumento da espessura do cavaco pode promover o entupimento ou instabilidade dentro das ranhuras, invertendo seu efeito.

4.1.4 Resultados de Rugosidade da Etapa 1

Antes da apresentação detalhada dos resultados, é importante destacar que, além do parâmetro de rugosidade média R_a , também foram avaliados os parâmetros R_z e R_q . Entretanto, ao longo de todas as condições experimentais analisadas, os três parâmetros apresentaram comportamento muito semelhante, com variações proporcionais entre si e mantendo a tendência em função das diferentes configurações de textura e condições de corte. Dessa forma, para evitar redundância na apresentação e discussão dos resultados, nesta seção serão apresentados apenas os resultados referentes ao parâmetro R_a , que é o indicador mais amplamente utilizado na literatura para avaliação da qualidade superficial em processos de usinagem.

A Figura 25 apresenta os resultados da rugosidade média R_a para o avanço de 0,1 mm/rev, comparando os oito tipos de textura analisados. A linha laranja representa o valor obtido para a ferramenta não texturizada (lisa), servindo como referência para a análise do impacto das texturas na qualidade superficial da peça usinada. Neste gráfico não aparecem barras vermelhas, pois as ferramentas texturizadas não resultaram em aumento da rugosidade média em comparação com a ferramenta lisa, apenas barras verdes, indicando que todas as

texturas promoveram redução da rugosidade média. Este padrão de cores vermelho e verde será utilizado ao longo de todo o trabalho.

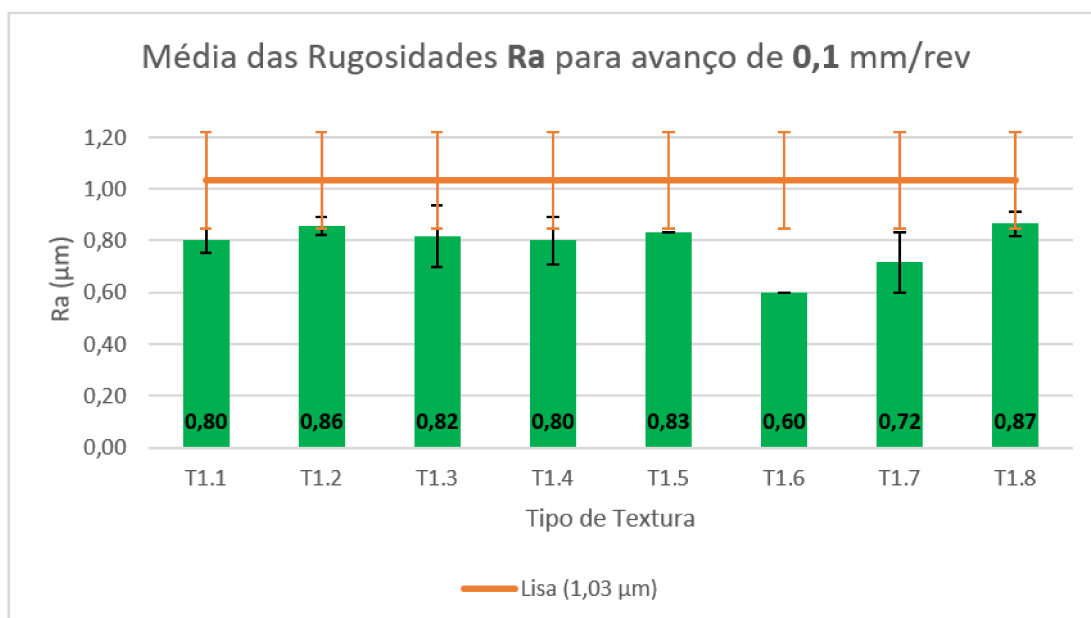


Figura 25 – Rugosidade média Ra para um avanço de 0,1 mm/rev.

Os resultados indicam um efeito positivo da texturização na qualidade superficial da peça para esse nível de avanço. Esse comportamento sugere que a presença das ranhuras na superfície de saída da ferramenta pode favorecer o escoamento do cavaco e reduzir fenômenos de aderência entre cavaco e ferramenta, contribuindo para um processo de corte mais estável e, consequentemente, para a formação de superfícies usinadas com menor rugosidade.

Entre as condições analisadas, destaca-se a textura T1.6 (textura perpendicular à aresta de corte, iniciando a 75 μm da aresta de corte, com profundidade 60 μm, largura 120 μm e espaçamento 120 μm), que apresentou o menor valor médio de rugosidade. Esse resultado sugere que suas determinadas combinações geométricas de textura podem atuar de maneira mais eficiente na modificação das condições tribológicas da interface cavaco–ferramenta. Nessa situação, a textura pode atuar reduzindo a área real de contato e facilitando o escoamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta de corte, reduzindo variações no processo de formação da superfície usinada.

As barras de erro observadas em algumas condições indicam certa variabilidade nos resultados experimentais, o que é inerente aos parâmetros de rugosidade e esperado em ensaios de usinagem envolvendo ligas de titânio, devido à natureza instável da formação do cavaco e à tendência desse material em apresentar adesão à ferramenta. Mesmo considerando essa

dispersão, observa-se que todas as ferramentas texturizadas apresentaram desempenho superior ao da ferramenta lisa para o avanço de 0,1 mm/rev, reforçando o potencial da texturização como estratégia para melhoria da qualidade superficial em operações de acabamento.

A Figura 26 apresenta os resultados da rugosidade média R_a para um avanço de 0,3 mm/rev. Diferentemente do comportamento observado para o avanço de 0,1 mm/rev, neste caso algumas texturas resultaram em valores de rugosidade superiores aos obtidos com a ferramenta lisa, enquanto outras mantiveram desempenho superior. Esse comportamento evidencia que o efeito das texturas na qualidade superficial depende fortemente das condições de corte, especialmente do avanço utilizado. Tal ideia será melhor abordada na Etapa 3, comparando um torneamento com variáveis selecionadas e dois níveis com valores típicos representativos de acabamento e desbaste.

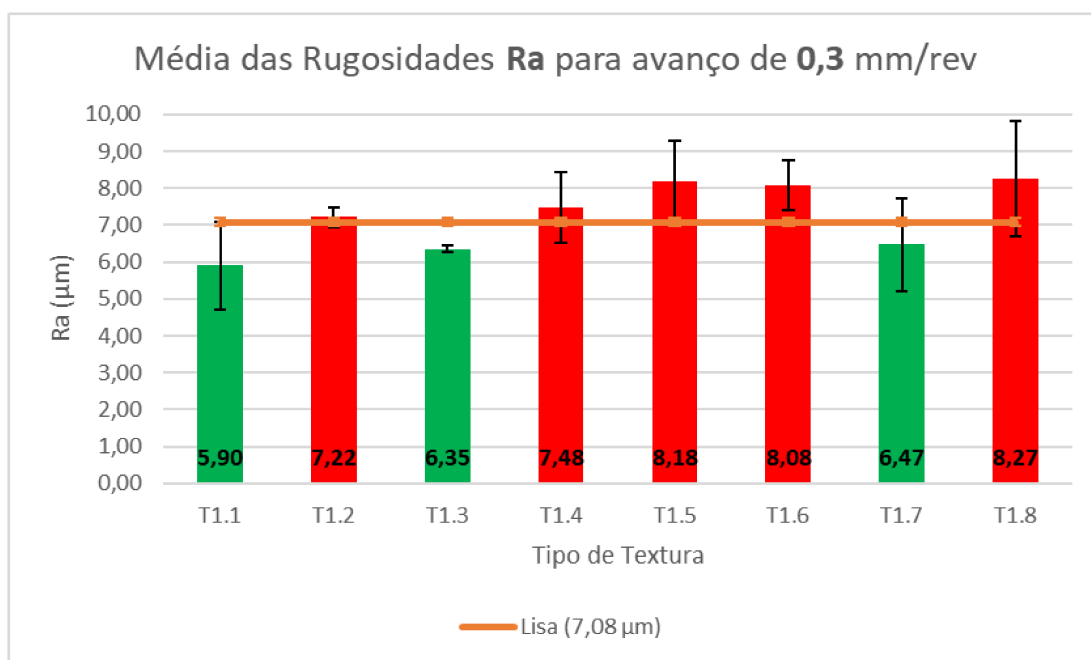


Figura 26 – Rugosidade média R_a para um avanço de 0,3 mm/rev.

Em avanços mais elevados, a espessura do cavaco aumenta significativamente, assim como aumenta o comprimento de contato cavaco-ferramenta, modificando o regime de interação entre o cavaco e a ferramenta. Nessas condições, determinadas geometrias de textura podem favorecer o acúmulo de material nas ranhuras ou alterar o padrão de escoamento do cavaco, o que pode resultar em maior instabilidade durante o corte e, consequentemente, em superfícies usinadas com maior rugosidade. São os casos das texturas T1.2, T1.4, T1.5, T1.6 e

T1.8 (com exceção da T1.5, todas são pares, ou seja, texturas com ranhuras perpendiculares à aresta principal de corte).

Por outro lado, algumas configurações de textura ainda foram capazes de reduzir a rugosidade mesmo em condições de avanço mais elevado. Isso sugere que determinadas geometrias podem manter sua eficiência tribológica mesmo sob maior carga de material removido, possivelmente devido à sua capacidade de reduzir a área de contato ou promover um escoamento mais controlado do cavaco sobre a superfície da ferramenta. São os casos das texturas T1.1, T1.3 e T1.7 (ressalta-se que os tipos ímpares são todas texturas com ranhura paralela à aresta principal de corte, o que pode favorecer uma estabilidade no escoamento do cavaco).

4.1.5 Resumo dos Resultados da Etapa 1

Para a avaliação dos resultados obtidos na Etapa 1, foram organizados dois conjuntos de gráficos que apresentam o comportamento das variáveis de resposta força de usinagem e rugosidade superficial (R_a) para as diferentes condições de textura analisadas, considerando os dois avanços investigados ($f = 0,1$ mm/rev e $f = 0,3$ mm/rev). Esses resultados permitem comparar diretamente o desempenho das ferramentas texturizadas em relação à ferramenta lisa, utilizada como condição de referência.

Inicialmente, são apresentados os valores médios absolutos obtidos para a força de usinagem e para a rugosidade superficial em cada condição experimental (Quadro 5). Esses dados permitem observar diretamente o efeito das diferentes texturas sobre o comportamento do processo de torneamento, possibilitando identificar quais configurações promoveram redução ou aumento das respostas analisadas em comparação com a ferramenta lisa. Observa-se que as texturas T1.1 e T1.7 apresentam valores médios das duas variáveis de saída, força e rugosidade, menores que a ferramenta lisa. As texturas T1.3, T1.4 e T1.8 apresentaram três (de quatro) situações favoráveis em comparação à ferramenta lisa e as texturas T1.2, T1.5 e T1.6 apresentaram resultados melhores que a lisa em metade das situações.

Variação do resultado em relação a uma ferramenta lisa (%)				
Etapa 1	f 0,1		f 0,3	
	Força	Ra	Força	Ra
T1.1	1,38	22,58	0,64	16,71
T1.2	5,47	16,94	-0,83	-1,88
T1.3	-3,05	20,97	6,39	10,35
T1.4	1,56	22,58	5,24	-5,65
T1.5	-1,55	19,35	0,55	-15,53
T1.6	4,87	41,94	-8,64	-14,12
T1.7	0,18	30,65	5,42	8,71
T1.8	2,55	16,13	1,72	-16,71

Quadro 5 – Comparação entre uma ferramenta lisa (sem textura) e os valores médios de força de usinagem (F) e rugosidade superficial (Ra) obtidos na Etapa 1 para as diferentes condições de textura, considerando os avanços de 0,1 mm/rev e 0,3 mm/rev.

Como já apresentado na Figura 21, recapitula-se que as texturas T1.1, T1.2, T1.3 e T1.4 correspondem às geometrias de menor dimensão, enquanto T1.5, T1.6, T1.7 e T1.8 possuem maiores dimensões. Além disso, as texturas ímpares (T1.1, T1.3, T1.5 e T1.7) apresentam orientação paralela à aresta de corte, ao passo que as texturas pares (T1.2, T1.4, T1.6 e T1.8) possuem orientação perpendicular. Em relação ao posicionamento, as texturas T1.1, T1.2, T1.5 e T1.6 foram produzidas mais próximas da aresta de corte, enquanto T1.3, T1.4, T1.7 e T1.8 apresentam maior distância da aresta principal.

Assim, pode-se fazer uma comparação entre os resultados do presente trabalho e dos trabalhos revisados na literatura. Primeiro focando nos resultados de força e comentando sobre os diferentes parâmetros de geometria das texturas.

Em relação ao tamanho das texturas, os resultados obtidos indicaram que as geometrias de menor dimensão apresentaram comportamento mais favorável na redução das forças de corte, principalmente para o avanço $f = 0,1$ mm/rev, com destaque para a textura T1.2. Já algumas texturas de maiores dimensões apresentaram desempenho menos eficiente e, em determinadas condições, promoveram aumento da força de usinagem. Esse comportamento está de acordo com os resultados apresentados por Ge et al. (2019), que verificaram que *grooves* com largura de 50 μm apresentaram as menores forças de corte entre as condições avaliadas.

Da mesma forma, Patel, Shah e Ozel (2019) observaram que o aumento da largura e do espaçamento das texturas reduz o contato cavaco-ferramenta, porém pode favorecer a aderência do material nos *grooves*, reduzindo a eficiência tribológica da ferramenta. Assim, os resultados sugerem que texturas excessivamente grandes podem comprometer o desempenho da usinagem, enquanto geometrias menores favorecem a redução das forças de corte.

Considerando a orientação das texturas, verificou-se que as geometrias perpendiculares apresentaram comportamento mais estável e eficiente na redução das forças de corte em comparação às texturas paralelas, principalmente nas condições de maior avanço. Esse resultado apresenta forte concordância com Arulkirubakaran, et al. (2019), que observaram menores forças de corte para texturas lineares perpendiculares em relação às paralelas e às ferramentas sem textura. Resultados semelhantes também foram relatados por Orra e Choudhury (2018), nos quais texturas verticais promoveram maior redução do coeficiente de atrito e das forças de corte quando comparadas às geometrias horizontais. Entretanto, Dhage, Jayal e Sarkar (2019) observaram melhor desempenho para texturas orientadas paralelamente à aresta de corte, divergindo parcialmente dos resultados obtidos neste trabalho. Essa diferença pode estar relacionada às diferentes condições de usinagem, materiais empregados (aço AISI 1045 torneado a seco) e combinações geométricas das texturas avaliadas em cada estudo.

Em relação à distância da aresta de corte, observou-se que as texturas posicionadas mais próximas da aresta tenderam a apresentar melhores resultados na redução das forças de usinagem, especialmente na condição de menor avanço, como no caso de T1.2 que reduziu em 5,47%. Esse comportamento pode estar relacionado à atuação mais direta da textura sobre a interface cavaco-ferramenta, reduzindo a área efetiva de contato e facilitando o escoamento do cavaco. Resultados semelhantes foram obtidos por Liu et al. (2018-B), que verificaram melhor desempenho tribológico para texturas posicionadas a menores distâncias da aresta principal de corte. Além disso, Yang, Yu e He (2019-A) relataram que a distância da textura em relação à aresta influencia diretamente os resultados de usinagem, embora com menor impacto quando comparado ao diâmetro e ao espaçamento das texturas.

A seguir, também pode ser feita a mesma abordagem, mas agora com foco nos resultados de rugosidade e comentando sobre os diferentes parâmetros de geometria das texturas de acordo com os resultados vistos na literatura.

Em relação ao tamanho das texturas, observou-se que os efeitos sobre a rugosidade superficial diferiram do comportamento verificado para as forças de corte. Enquanto algumas texturas de menores dimensões apresentaram melhoria no acabamento superficial, os melhores resultados gerais de rugosidade foram obtidos pela textura T1.6, pertencente ao grupo de

maiores dimensões. Esse comportamento sugere que texturas maiores podem favorecer o escoamento do cavaco e reduzir irregularidades superficiais em determinadas condições de usinagem. Resultados semelhantes foram encontrados por Liu et al. (2018-B), que verificaram melhor qualidade superficial para uma combinação específica de largura e espaçamento dos *grooves*. Por outro lado, Li et al. (2019) observaram que texturas menores e mais próximas entre si proporcionaram menores valores de rugosidade, mostrando que o efeito do tamanho da textura depende fortemente da geometria empregada e das condições de corte. Além disso, Yang et al. (2019-A) destacaram que o tamanho da textura é o parâmetro de maior influência sobre a rugosidade superficial, seguido do espaçamento, profundidade e distância da aresta de corte.

Considerando a orientação das texturas, verificou-se que as geometrias perpendiculares apresentaram os resultados mais extremos para rugosidade, sendo responsáveis tanto pelas maiores reduções quanto pelos aumentos dos valores de R_a no avanço $f = 0,3$ mm/rev. Em geral, as texturas paralelas apresentaram comportamento mais moderado, enquanto algumas geometrias perpendiculares favoreceram acabamento superficial superior. Esse comportamento apresenta concordância parcial com Arulkirubakaran et al. (2019), que observaram melhor acabamento superficial para texturas lineares perpendiculares devido à melhoria na formação do cavaco e redução do desgaste. De forma semelhante, Pan et al. (2018) verificaram que *grooves* paralelos aumentaram a rugosidade superficial, enquanto *grooves* perpendiculares apresentaram desempenho intermediário e menor formação de rebarbas serrilhadas. Entretanto, Chen et al. (2019) observaram que texturas paralelas à aresta principal reduziram a formação de rebarbas, embora sem influência significativa sobre a rugosidade média, evidenciando que o efeito da orientação depende do mecanismo dominante de formação da superfície usinada.

Em relação à distância da aresta de corte, observou-se que as texturas posicionadas mais próximas da aresta tenderam a apresentar melhor desempenho no acabamento superficial, principalmente nas condições de menor avanço. Esse resultado sugere que a atuação mais próxima da zona de cisalhamento favorece a redução do atrito e melhora a estabilidade do escoamento do cavaco sobre a superfície da ferramenta. Resultados semelhantes foram reportados por Liu et al. (2018-B), que identificaram melhor qualidade superficial para texturas posicionadas a distâncias reduzidas da aresta principal de corte. Yang, Yu e He (2019-A) também destacaram que, embora a distância da textura tenha influência menor que o diâmetro e o espaçamento, seu efeito sobre a rugosidade não pode ser desconsiderado.

Além da análise dos valores médios absolutos, foi realizada também uma avaliação da variabilidade dos resultados por meio do cálculo do coeficiente de variação percentual para

cada condição experimental (Quadro 6). Esse parâmetro permite avaliar a estabilidade dos ensaios realizados, indicando o nível de dispersão dos resultados obtidos em relação à média. A análise do coeficiente de variação é particularmente importante para verificar a necessidade de repetição dos ensaios experimentais.

Coeficiente de Variação Percentual (CV %)				
Etapa 1	f 0,1		f 0,3	
Tipo	F	Ra	F	Ra
Lisa	0,03	18,25	3,02	1,66
T1.1	2,42	5,89	1,26	19,97
T1.2	3,47	4,12	1,73	3,59
T1.3	4,33	14,43	0,47	1,52
T1.4	1,79	11,79	2,66	12,91
T1.5	0,43	0,00	0,43	13,54
T1.6	2,83	0,00	4,31	8,46
T1.7	4,68	16,44	2,54	19,68
T1.8	2,73	5,44	0,17	18,82

Quadro 6 – Coeficiente de variação percentual das medições de força de usinagem (F) e rugosidade superficial (Ra) para as diferentes condições de textura na Etapa 1, considerando os avanços de 0,1 mm/rev e 0,3 mm/rev.

De modo geral, valores reduzidos de coeficiente de variação indicam boa repetibilidade do processo experimental. Neste trabalho, foi adotado como critério que coeficientes de variação inferiores a 20% indicam estabilidade suficiente dos resultados, descartando a necessidade de realização de réplicas adicionais dos ensaios. Dessa forma, essa análise serve como uma verificação da confiabilidade experimental dos dados obtidos na Etapa 1.

4.1.6 Preparação para a Etapa 2

Para iniciar a segunda etapa do Planejamento Composto Central (PCC) na Etapa 2, foi necessário identificar quais variáveis exerceram maior influência sobre a resposta do processo e, a partir disso, estabeleceu-se quais fatores deveriam continuar sendo investigados. Nesse contexto, as variáveis que apresentam menor impacto foram fixadas em um determinado nível, permitindo concentrar a análise naquelas que efetivamente contribuíram para as variações observadas nos resultados experimentais.

Com esse objetivo, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA), ferramenta estatística amplamente utilizada para avaliar a significância dos fatores envolvidos em um planejamento experimental, nos resultados da Etapa 1, considerando um índice de confiabilidade de 95%. Por meio dessa análise, foi possível quantificar a contribuição de cada variável e de suas interações sobre a resposta do processo, fornecendo subsídios para a definição das variáveis que foram mantidas no planejamento da etapa subsequente.

A Figura 27 apresenta o gráfico de Pareto, destacando a influência dos parâmetros nas forças de usinagem com base na análise estatística. Por meio da ANOVA, foi possível identificar os parâmetros e sua significância no processo. Como esperado, o avanço foi o fator mais influente na usinagem do titânio, sendo responsável pela maior variação na força de usinagem, seguido pelas suas interações. Individualmente, a variável distância da aresta de corte foi significativa, enquanto os parâmetros direção da textura e dimensão da textura não apresentaram significância estatística. Entretanto, a direção da textura tornou-se significativa quando variada em conjunto com o avanço. No gráfico da Figura 27, as variáveis são apresentadas individualmente e em pares (no formato NbyN). Por outro lado, a dimensão da textura não apresentou impacto relevante em nenhuma das condições testadas, seja isoladamente ou em conjunto com alguma outra variável.

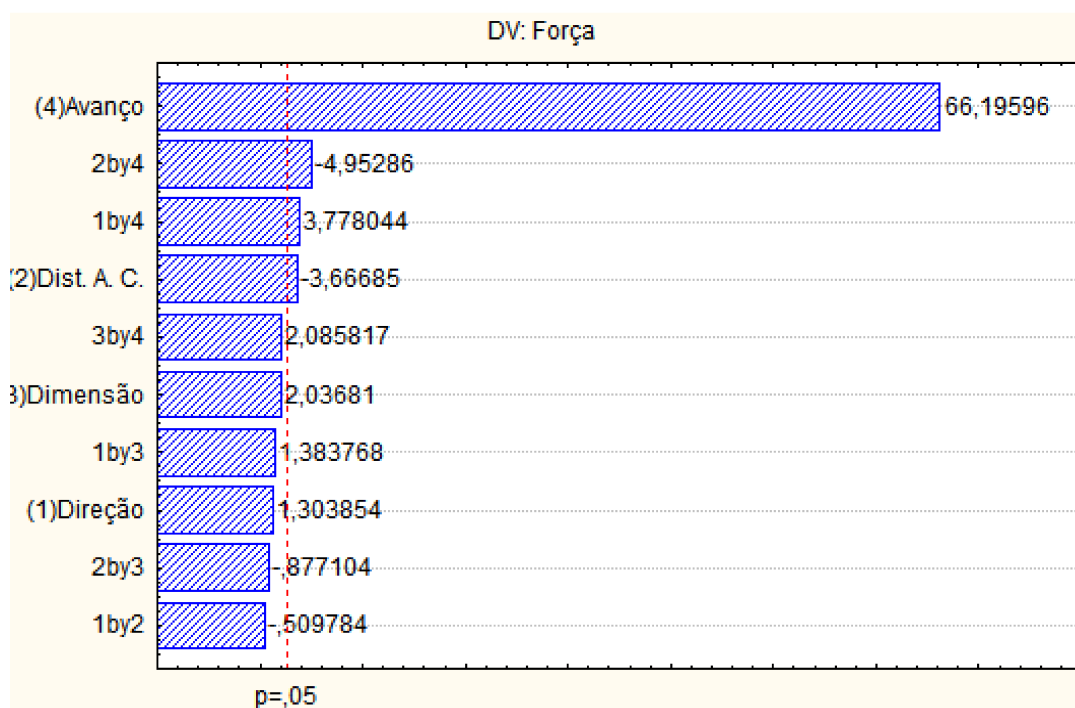


Figura 27 – Influência dos parâmetros na força de usinagem obtida a partir de uma Análise de Variância (ANOVA).

A Figura 28 apresenta o gráfico de Pareto obtido a partir da análise estatística realizada para os resultados de rugosidade. Por meio da análise de variância (ANOVA), foi possível identificar os parâmetros mais influentes na rugosidade superficial obtida durante o processo de usinagem. Assim como observado na análise das forças de usinagem, o avanço foi o fator mais influente nos resultados de rugosidade, apresentando contribuição significativamente superior às demais variáveis analisadas e acima do índice de confiabilidade de 95%.

Os parâmetros geométricos da textura direção, dimensão e distância da aresta de corte não apresentaram influência estatística significativa, quando avaliados individual e coletivamente. Embora abaixo do índice de confiabilidade estipulado, algumas interações entre os parâmetros também foram identificadas, indicando que o efeito das texturas na qualidade superficial pode depender da combinação entre diferentes variáveis do processo. Esses resultados reforçam a importância de abordagens estatísticas no desenvolvimento de ferramentas texturizadas, permitindo identificar não apenas a influência isolada dos parâmetros, mas também suas interações no desempenho do processo de usinagem.

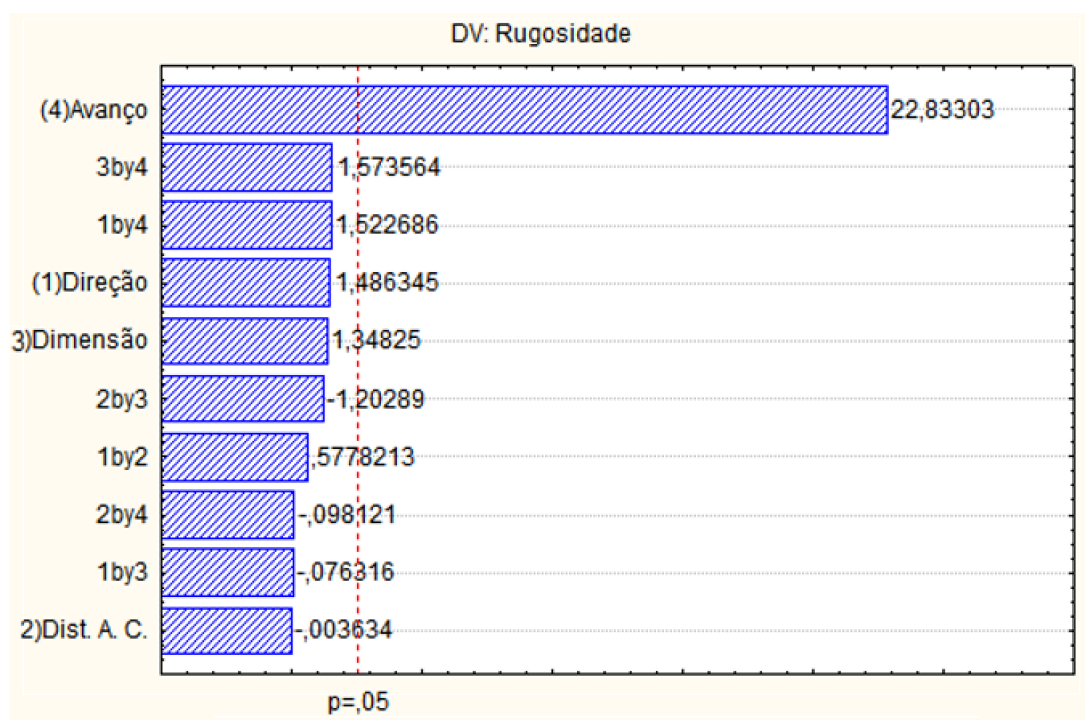


Figura 28 – Influência dos parâmetros na rugosidade obtida a partir de uma Análise de Variância (ANOVA).

Portanto, nos resultados de força de usinagem, observou-se que a variável dimensão da textura não apresentou significância estatística dentro do intervalo investigado, diferentemente

das demais variáveis analisadas. Tanto a distância da textura em relação à aresta de corte quanto a direção da textura demonstraram influência estatisticamente relevante no processo, seja de forma isolada ou por meio de interações com outras variáveis, especialmente com o avanço. Esse comportamento indica que tais parâmetros exercem papel mais direto na modificação das condições tribológicas da interface cavaco–ferramenta e, conseqüentemente, nos esforços mecânicos envolvidos no processo de corte. Esse mesmo padrão também foi observado na análise dos resultados de rugosidade. Embora, nesse caso, apenas o avanço tenha apresentado significância estatística clara, esse resultado deve ser interpretado considerando que essa variável possui influência desproporcionalmente elevada na formação da superfície usinada, sendo amplamente reconhecida na literatura como o principal fator determinante da rugosidade em operações de torneamento. Ainda assim, observa-se que a variável dimensão novamente não apresentou influência estatisticamente relevante quando comparada às demais variáveis do estudo.

Diante desse comportamento consistente observado tanto para as forças de usinagem quanto para a rugosidade superficial, a variável dimensão da textura foi selecionada como parâmetro a ser fixo na Etapa 2 do planejamento experimental. Essa decisão se justifica pelo fato de que, ao não apresentar significância estatística dentro do domínio investigado, e para um índice de confiabilidade de 95%, sua variação tende a contribuir menos para a otimização do processo em comparação com as demais variáveis. Dessa forma, ao manter essa variável constante, torna-se possível concentrar a análise estatística nas variáveis que efetivamente demonstraram maior influência no desempenho da usinagem.

Assim, para a definição do valor a ser adotado para essa variável fixa na etapa seguinte (seja o ponto fatorial +1 ou o ponto fatorial -1), tornou-se necessário determinar qual condição dimensional apresenta comportamento mais favorável ao torneamento da liga Ti6Al4V. Para isso, foi realizada uma análise comparativa entre os resultados obtidos para as duas condições dimensionais investigadas, avaliando seu desempenho em termos de forças de usinagem e qualidade superficial. A partir dessa comparação, foi possível identificar qual faixa dimensional apresenta melhor desempenho global, permitindo definir de forma fundamentada o valor a ser mantido fixo no planejamento composto central que foi aplicado na Etapa 2.

Para complementar a análise estatística apresentada anteriormente, foram construídos gráficos de médias marginais com intervalos de confiança de 95%, permitindo avaliar de forma visual a influência das variáveis investigadas nas respostas do processo. Esses gráficos possibilitam observar tendências de comportamento entre os níveis das variáveis, bem como possíveis interações entre os fatores estudados. A seguir, os gráficos são apresentados

individualmente, permitindo uma análise progressiva dos efeitos das variáveis direção da textura, distância da textura em relação à aresta de corte e dimensão da textura sobre as respostas analisadas.

Inicialmente, apresenta-se a Figura 29, referente à influência da direção da textura sobre a força de usinagem, considerando os dois níveis da variável dimensão.

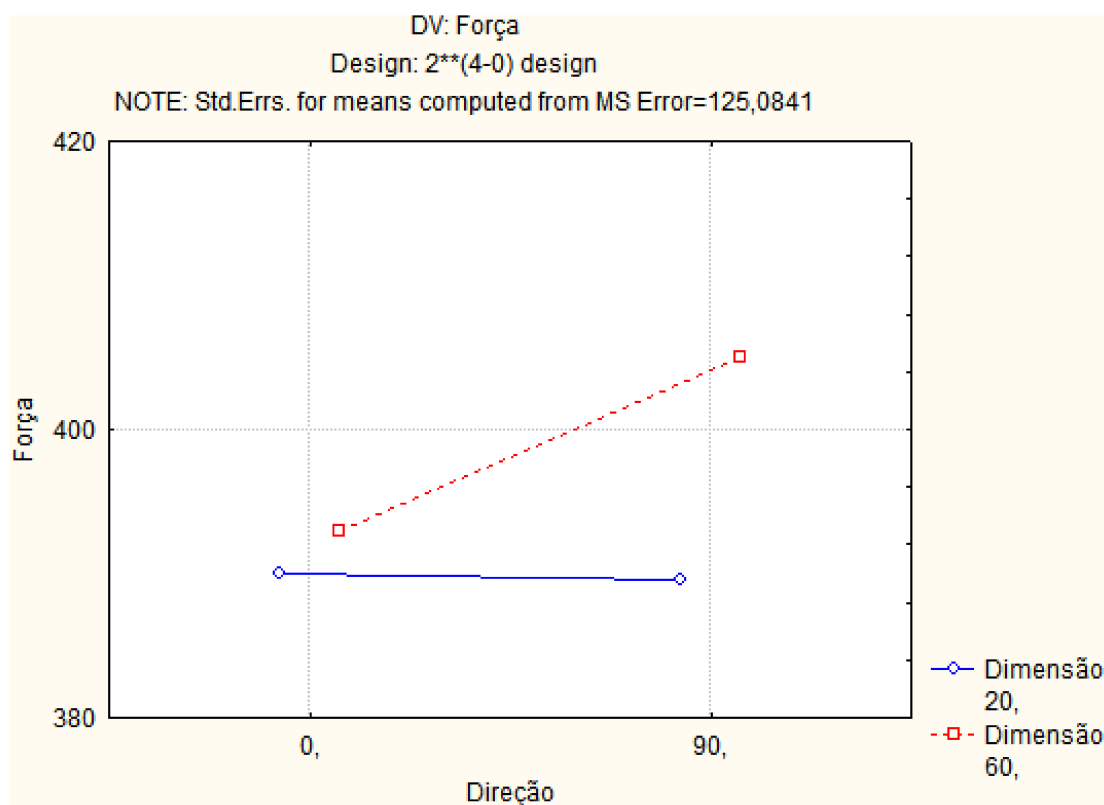


Figura 29 – Gráfico de médias marginais da força de usinagem (em N) em função da direção da textura (em °), considerando dois níveis da variável dimensão, com intervalos de confiança de 95%. Os valores das abcissas estão deslocados, porém não variam na realidade, é apenas uma formatação do software que gerou o gráfico, e este detalhe se repete em todas gráfcos de médias marginais apresentadas neste trabalho.

Primeiramente, analisando o gráfico da Figura 29 de médias marginais da força de usinagem em função da direção da textura, observa-se que para a dimensão de “20 μm ” (sendo este número apenas uma referência à dimensão de profundidade, e que no caso é uma observação da dimensão menor) a força média se mantém praticamente constante entre as duas direções analisadas (0° e 90°). Já para a dimensão de 60 μm , observa-se um aumento mais pronunciado da força quando a direção da textura passa de 0° para 90°. Esse comportamento indica que texturas de maior dimensão tornam o processo mais sensível à orientação das

ranhuras em relação à aresta de corte. Em outras palavras, quando as texturas são maiores, a direção passa a influenciar mais fortemente a interação cavaco–ferramenta, possivelmente devido ao aumento da interferência geométrica das ranhuras no escoamento do cavaco.

Na sequência, é apresentado o gráfico da Figura 30 que relaciona a força de usinagem com a distância da textura em relação à aresta de corte, também considerando os dois níveis da variável dimensão.

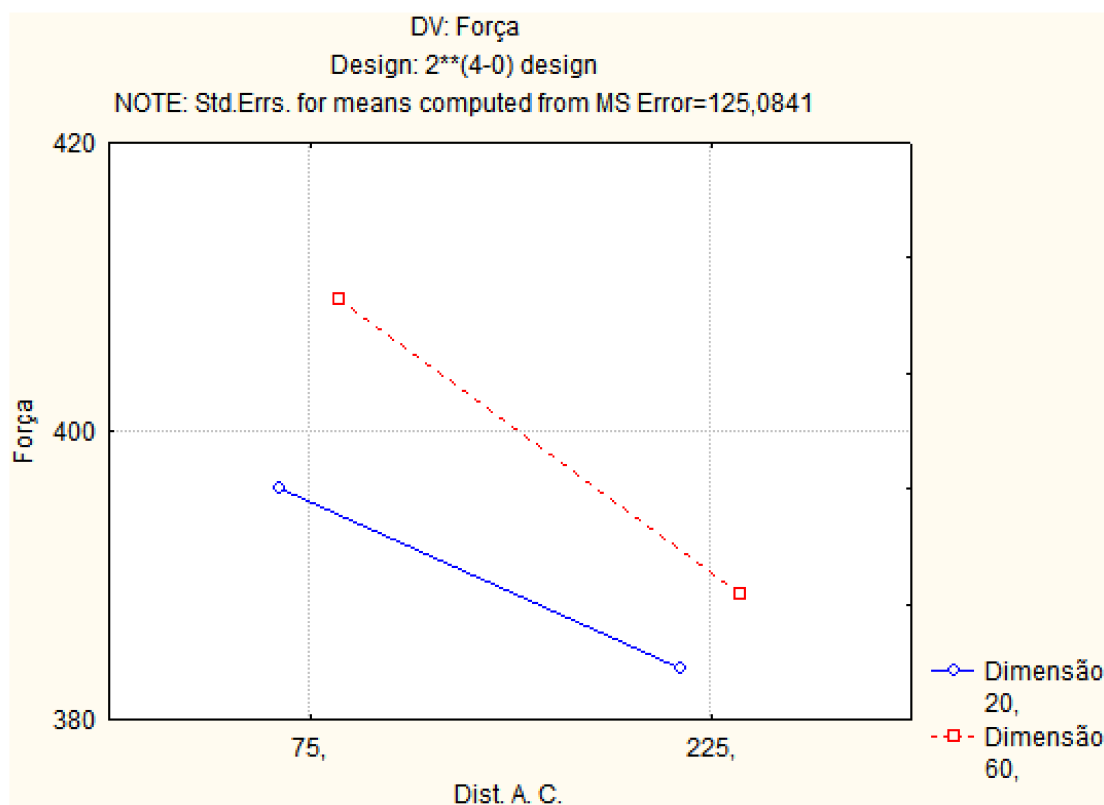


Figura 30 – Gráfico de médias marginais da força de usinagem (em N) em função da distância da textura em relação à aresta de corte (em μm), considerando dois níveis da variável dimensão, com intervalos de confiança de 95%.

No gráfico da Figura 30 que relaciona a força de usinagem com a distância da textura em relação à aresta de corte, observa-se uma tendência de redução da força com o aumento dessa distância para ambas as dimensões analisadas. Entretanto, essa redução é mais pronunciada para a dimensão maior (60 μm). Isso sugere que texturas maiores próximas à aresta de corte podem intensificar o atrito ou gerar maior perturbação no fluxo inicial do cavaco, aumentando os esforços de corte. Quando posicionadas mais afastadas da aresta, essas texturas passam a interferir menos na formação do cavaco, reduzindo a força necessária para o processo de usinagem.

Posteriormente, apresenta-se o gráfico da Figura 31 referente à influência da direção da textura sobre a rugosidade superficial, representada pelo parâmetro Ra.

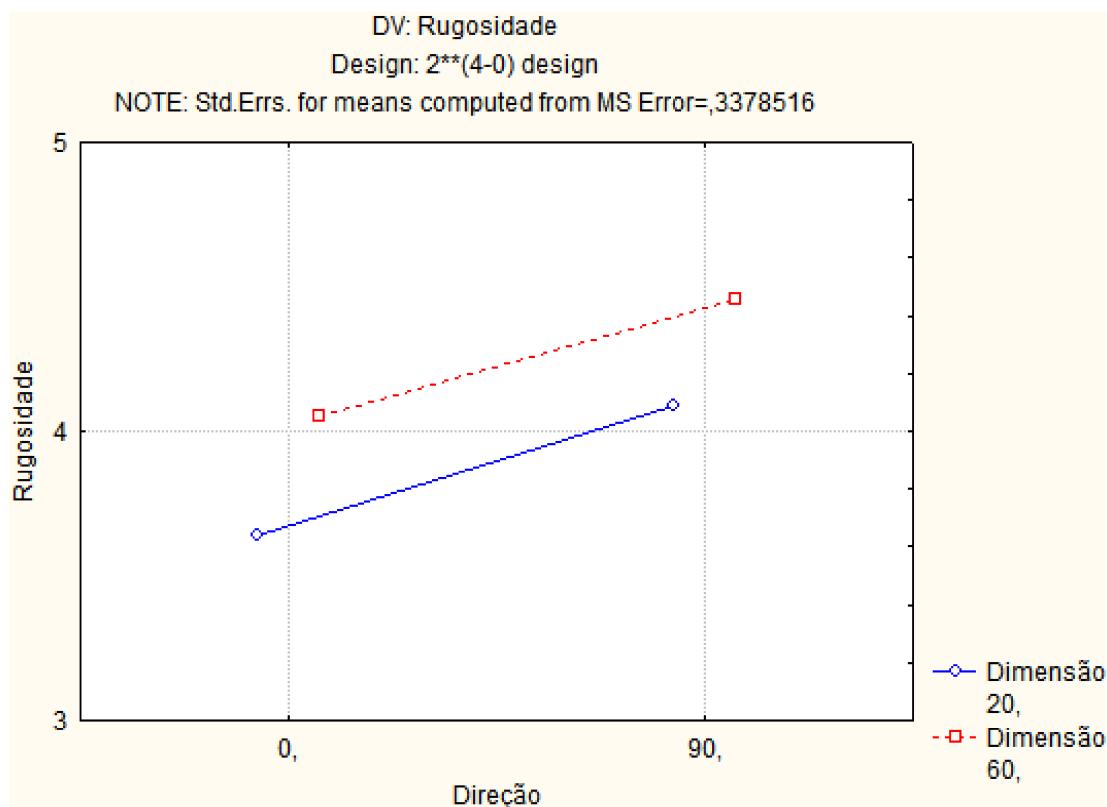


Figura 31 – Gráfico de médias marginais da rugosidade superficial Ra (em μm) em função da direção da textura (em $^\circ$), considerando dois níveis da variável dimensão, com intervalos de confiança de 95%.

Analisando o gráfico da Figura 31 de rugosidade em função da direção da textura, observa-se que para ambas as dimensões ocorre um aumento da rugosidade quando a direção passa de 0° para 90° . Entretanto, novamente a dimensão maior apresenta valores médios superiores de rugosidade em comparação à dimensão menor. Isso sugere que texturas maiores podem gerar maior instabilidade na interação cavaco–ferramenta, refletindo em superfícies usinadas com maior irregularidade. Já as texturas menores tendem a produzir superfícies menos rugosas, possivelmente devido a uma interação mais suave com o cavaco.

Por fim, é apresentado o gráfico da Figura 32 que relaciona a rugosidade superficial (Ra) com a distância da textura em relação à aresta de corte, novamente considerando os dois níveis da variável dimensão.

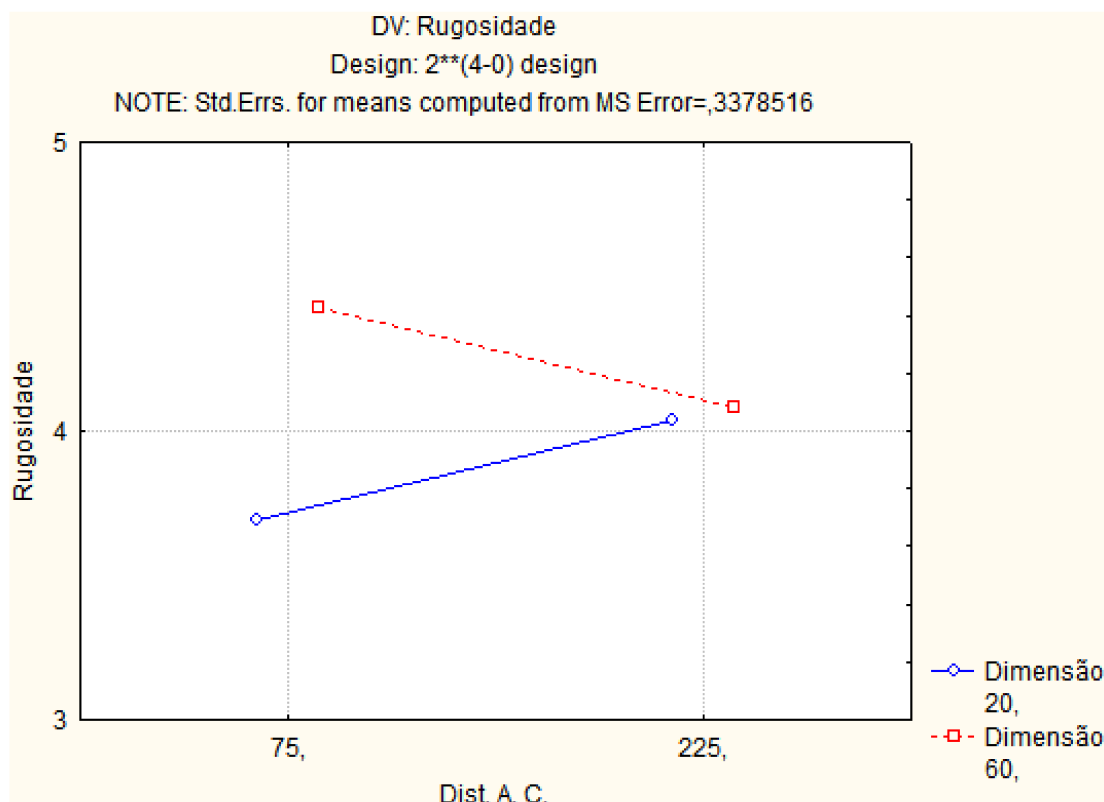


Figura 32 – Gráfico de médias marginais da rugosidade superficial Ra (em μm) em função da distância da textura em relação à aresta de corte (em μm), considerando dois níveis da variável dimensão, com intervalos de confiança de 95%.

No gráfico da Figura 32, que relaciona a rugosidade com a distância da aresta de corte, observa-se um comportamento distinto entre as duas dimensões. Para a dimensão de 20/40/40 μm , há um aumento da rugosidade quando a textura é posicionada mais distante da aresta de corte. Já para a dimensão de 60 μm ocorre o comportamento oposto, com redução da rugosidade à medida que a textura se afasta da aresta. Esse resultado reforça a hipótese de que texturas maiores próximas à aresta podem gerar perturbações mais intensas na formação do cavaco, impactando negativamente a qualidade da superfície usinada.

Assim, a análise conjunta dos quatro gráficos (Figuras 29 a 32) indicou que a dimensão da textura influencia principalmente o nível médio das respostas do processo, embora não tenha apresentado significância estatística na análise de variância. Em praticamente todas as condições analisadas, a dimensão menor (20 μm) resultou em valores médios inferiores tanto para força de usinagem quanto para rugosidade, indicando um comportamento mais favorável ao processo de torneamento da liga Ti6Al4V. Além disso, observa-se que texturas maiores tornam o processo mais sensível às variações de direção e distância da aresta de corte,

possivelmente devido à maior interferência geométrica dessas ranhuras na interface cavaco–ferramenta.

Dessa forma, considerando simultaneamente os resultados de força e rugosidade, conclui-se que a dimensão menor apresenta comportamento globalmente mais favorável para o processo de usinagem analisado. Por esse motivo, a variável dimensão foi fixada no nível de 20 μm para a Etapa 2 do planejamento experimental, permitindo que a investigação subsequente fosse concentrada nas variáveis que demonstraram maior influência no processo, especialmente a direção da textura e a distância em relação à aresta de corte.

4.2 Etapa 2

Após a conclusão da Etapa 1 e a identificação das variáveis mais influentes no processo, iniciou-se a Etapa 2 do estudo experimental, baseada na aplicação do Planejamento Composto Central (PCC). Esse método de planejamento experimental é amplamente utilizado em estudos de otimização de processos, pois permite modelar superfícies de resposta e avaliar simultaneamente efeitos lineares, quadráticos e de interação entre as variáveis do processo. Dessa forma, o PCC possibilita a construção de modelos matemáticos capazes de descrever o comportamento das respostas analisadas dentro de uma determinada região experimental.

4.2.1 Planejamento da Etapa 2

O Planejamento Composto Central é composto por três conjuntos principais de pontos experimentais: pontos fatoriais, pontos axiais e pontos centrais. Os pontos fatoriais correspondem às combinações dos níveis alto e baixo das variáveis estudadas, formando a base do planejamento fatorial. Esses pontos permitem avaliar os efeitos principais das variáveis e suas possíveis interações. Já os pontos axiais são posicionados ao longo de cada eixo das variáveis independentes, em níveis além dos pontos fatoriais, sendo responsáveis por permitir a estimativa dos efeitos quadráticos do modelo. Por fim, os pontos centrais correspondem à condição intermediária entre todos os fatores analisados e são repetidos ao longo do planejamento com o objetivo de estimar o erro experimental e avaliar a curvatura da superfície de resposta, a Equação 3 mostra o cálculo de um ponto central.

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

onde:

- X_0 = valor da variável no ponto central do planejamento
- X_{+1} = nível superior do ponto fatorial
- X_{-1} = nível inferior do ponto fatorial

Um parâmetro importante no planejamento composto central é o valor de α (alpha), que define a distância dos pontos axiais em relação ao centro do planejamento. A escolha desse valor influencia diretamente propriedades estatísticas do planejamento, como rotabilidade e ortogonalidade. A rotabilidade garante que a variância da resposta prevista seja constante para todos os pontos que estejam à mesma distância do centro experimental, enquanto a ortogonalidade permite que os efeitos dos fatores sejam estimados de forma independente, reduzindo correlações entre os coeficientes do modelo. Neste trabalho, foi adotado o valor de $\alpha = 1,6818$, que atende às condições necessárias para garantir essas propriedades no planejamento composto central utilizado.

A partir do valor de α e dos níveis definidos para os pontos fatoriais, é possível calcular os níveis correspondentes aos pontos axiais de cada variável do planejamento. Esses valores são obtidos a partir da distância entre os níveis fatoriais e o ponto central do planejamento, permitindo determinar os limites experimentais estendidos utilizados no PCC. A determinação dos níveis axiais das variáveis no Planejamento Composto Central pode ser realizada a partir da distância entre o ponto central e os níveis fatoriais definidos para cada variável. Essa relação permite calcular os valores correspondentes aos pontos axiais a partir do valor de α adotado no planejamento. Assim, os níveis axiais são obtidos pela Equação 4:

$$X_\alpha = \left(\frac{x_{+1} + x_{-1}}{2} \right) \pm \alpha * \left(\frac{x_{+1} - x_{-1}}{2} \right) \quad (4)$$

onde:

- X_α = valor da variável no ponto axial
- α = distância axial do planejamento (neste trabalho, $\alpha=1,6818$)
- X_{+1} = nível superior do ponto fatorial
- X_{-1} = nível inferior do ponto fatorial

Seguindo essa metodologia, calculou-se os pontos fatoriais, centrais e axiais, os quais são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Níveis de codificação adotados para as variáveis do PCC na etapa 2

Variável	$-\alpha$ (axial)	-1 (fatorial)	0 (central)	$+1$ (fatorial)	$+\alpha$ (axial)
Distância da textura à aresta de corte (μm)	25	75	150	225	275
Direção dos sulcos ($^\circ$)	-30	0	45	90	120
Avanço de corte (mm/rev)	0,05	0,10	0,20	0,30	0,35

O Quadro 7 apresenta a versão final do planejamento experimental da Etapa 2, correspondendo a uma atualização do Quadro 2 apresentado anteriormente na Subseção 3.2.2. Naquele momento, o quadro representava apenas a estrutura preliminar das variáveis a serem investigadas. Com a conclusão da Etapa 1 e a análise dos resultados experimentais, foi possível definir de forma mais precisa os fatores que deveriam permanecer variáveis e aqueles que poderiam ser fixados no planejamento subsequente. Conforme discutido na Subseção 4.1.5, a variável dimensão da textura foi a que apresentou menor influência nas respostas analisadas, tanto para força de usinagem quanto para rugosidade superficial, e por isso passou a ser fixada. Dessa forma, após a análise dos gráficos de médias marginais, optou-se por fixar essa variável no seu nível -1 , correspondente às texturas de menor dimensão por tenderem a melhores resultados. Tal condição é caracterizada por profundidade de $20\ \mu\text{m}$, largura de $40\ \mu\text{m}$ e espaçamento de $40\ \mu\text{m}$.

A partir dessa definição, o Quadro 7 passa a apresentar o planejamento experimental da Etapa 2, contemplando apenas as variáveis remanescentes a serem estudadas. Os níveis experimentais foram estabelecidos utilizando a metodologia do Planejamento Composto Central, conforme descrito anteriormente, incluindo o cálculo dos pontos fatoriais, centrais e axiais a partir das equações apresentadas para determinação dos valores de X_0 e X_α . Dessa forma, o quadro consolida a configuração final do planejamento experimental adotado para a segunda etapa do estudo.

ETAPA 2: Planejamento Composto Central				
Variáveis de Saída: Força e Rugosidade				
Nº de condições	TIPOS DE TEXTURAS	Variáveis mais Influentes na Etapa 1		
		DIREÇÃO [°]	DISTÂNCIA DA ARESTA DE CORTE [μm]	AVANÇO
2.1	T1.1	0	75	0,1
2.2	T1.2	90	75	0,1
2.3	T1.3	0	225	0,1
2.4	T1.4	90	225	0,1
2.5	T1.1	0	75	0,3
2.6	T1.2	90	75	0,3
2.7	T1.3	0	225	0,3
2.8	T1.4	90	225	0,3
2.9	T2.0	45	150	0,2
2.10	T2.0	45	150	0,2
2.11	T2.1-α	-30	150	0,2
2.12	T2.1+α	120	150	0,2
2.13	T2.2-α	45	25	0,2
2.14	T2.2+α	45	275	0,2
2.15	T2.0-α	45	150	0,05
2.16	T2.0+α	45	150	0,35
Testes Extras				
2.TE1	T2.0 inv.	-45	150	0,2
2.TE2	sem textura	sem textura	sem textura	0,2
2.TE3	sem textura	sem textura	sem textura	0,05
2.TE4	sem textura	sem textura	sem textura	0,35

Quadro 7 – Ensaio de torneamento da Etapa 2.

Na Etapa 2, com exceção do avanço, os ensaios de torneamento foram realizados utilizando parâmetros de corte mantidos constantes, de forma a garantir condições comparáveis entre todas as configurações de ferramentas analisadas. A profundidade de corte (a_p) foi fixada em 1 mm e a velocidade de corte (V_c) em 70 m/min. Já o avanço (f) foi investigado em 5 níveis

distintos: 0,05 (ponto axial $-\alpha$) 0,1 (ponto fatorial -1), 0,2 (ponto central 0), 0,3 (ponto fatorial +1) e 0,35 (ponto axial $+\alpha$), todos valores em mm/rev.

Observando o Quadro 7, nota-se que 8 condições de ensaios coincidem com experimentos já realizados na etapa anterior, o que possibilitou o reaproveitamento de alguns ensaios. Os ensaios equivalentes são 1.1 com 2.1, 1.2 com 2.2, 1.3 com 2.3, 1.4 com 2.4, 1.9 com 2.5, 1.10 com 2.6, 1.11 com 2.7 e 1.12 com 2.8.

Ao definir os níveis centrais e axiais da variável direção da textura, foi necessário estabelecer também o sentido de rotação utilizado como referência para a variação angular das ranhuras. Isso foi importante porque a direção das texturas foi definida a partir da direção da aresta de corte, sendo necessário padronizar se a variação dos ângulos ocorre no sentido horário ou no sentido anti-horário. A Figura 33 ilustra essa convenção adotada no presente trabalho. Como referência, foi considerada a condição de 0° , correspondente a ranhuras paralelas à aresta de corte. A partir dessa referência, adotou-se o sentido horário como padrão para a definição dos demais ângulos investigados no planejamento experimental. Adicionalmente, com o objetivo de ampliar a análise e explorar possíveis efeitos assimétricos da orientação das texturas, também foi incluída no estudo uma ferramenta com ranhuras orientadas no sentido inverso, a -45° (chamada de “T2.0 inv”), conforme previamente indicado no Quadro 7.

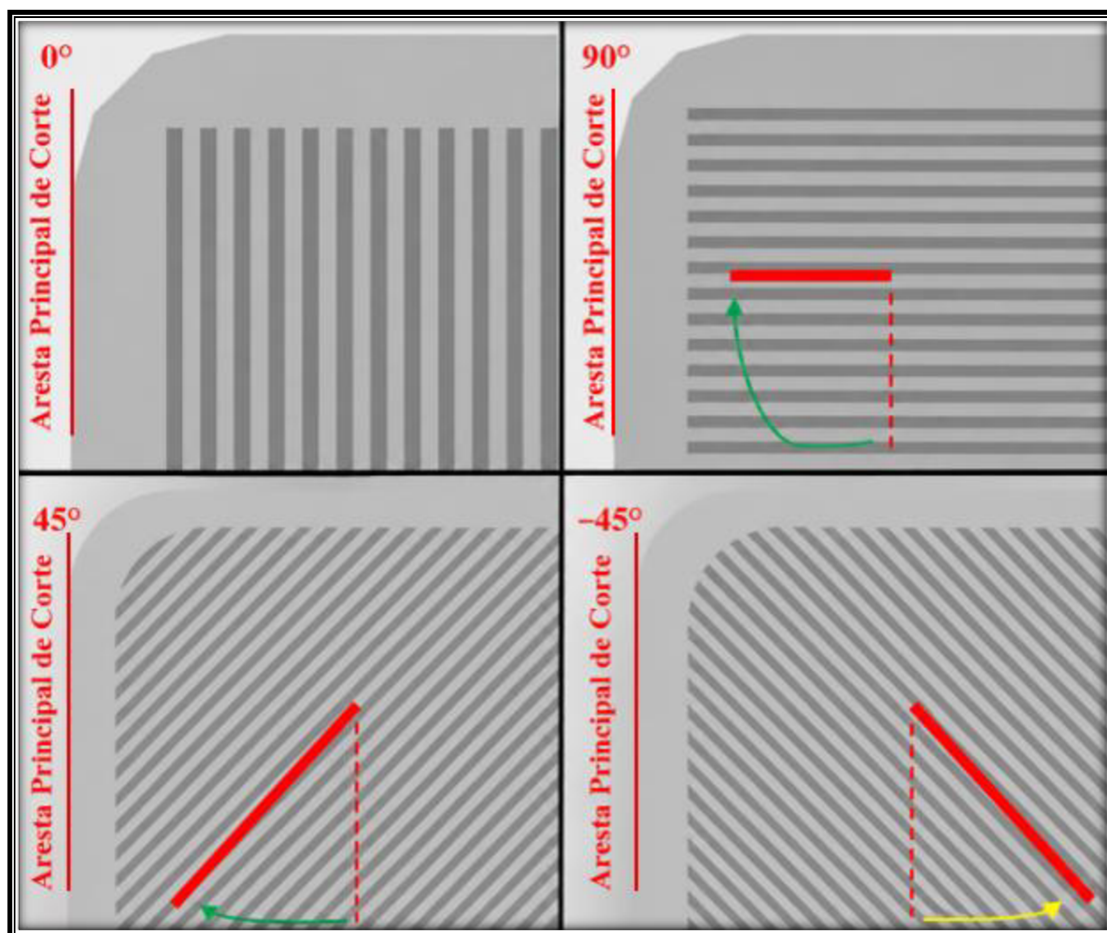


Figura 33 – Sentido de rotação para variação da direção das ranhuras. O sentido horário foi o adotado, tendo como referência uma ranhura a 0° (paralela à aresta de corte). A fim de ampliar a investigação, uma ferramenta de -45° (tipo T2.0 inv) também foi investigada, conforme mostrado no Quadro 7.

4.2.2 Texturas Produzidas na Etapa 2

As texturas geradas para os ensaios da Etapa 2 seguiram o mesmo padrão de fabricação e qualidade já apresentado na Subseção 4.1.2. O processo de texturização foi mantido inalterado, garantindo consistência nas características de fabricação, acabamento superficial das ranhuras e integridade da aresta de corte. Dessa forma, assegurou-se que eventuais variações observadas nos resultados experimentais fossem associadas principalmente às diferenças geométricas das texturas investigadas, e não a variações no processo de fabricação. Assim, conforme anunciado na Subseção 4.2.1, as novas ferramentas texturizadas diferem apenas em relação à geometria das ranhuras, mantendo-se os padrões de qualidade e características de fabricação adotados anteriormente.

4.2.3 Resultados de Força da Etapa 2

A Figura 34 apresenta os resultados das forças médias de usinagem obtidas para as diferentes geometrias de textura investigadas na Etapa 2, torneadas com um avanço de 0,2 mm/rev. Assim como nos gráficos apresentados na Etapa 1, a linha horizontal representa o valor obtido para a ferramenta não texturizada (lisa), utilizada como referência para comparação do desempenho das ferramentas texturizadas. Os tipos “T2.0” são com todas as variáveis em nível central, os tipos “T2.1” variam a direção nos pontos axiais e os tipos “T2.2” variam a distância da aresta de corte nos seus pontos axiais. O tipo “T2.0 inv” trata-se de uma “T2.0” porém com o sentido de rotação invertido, conforme explicado na Figura 33. Barras em verde indicam condições em que a textura resultou em redução da força média de usinagem em relação à ferramenta lisa, enquanto barras em vermelho indicam condições nas quais houve aumento da força média.

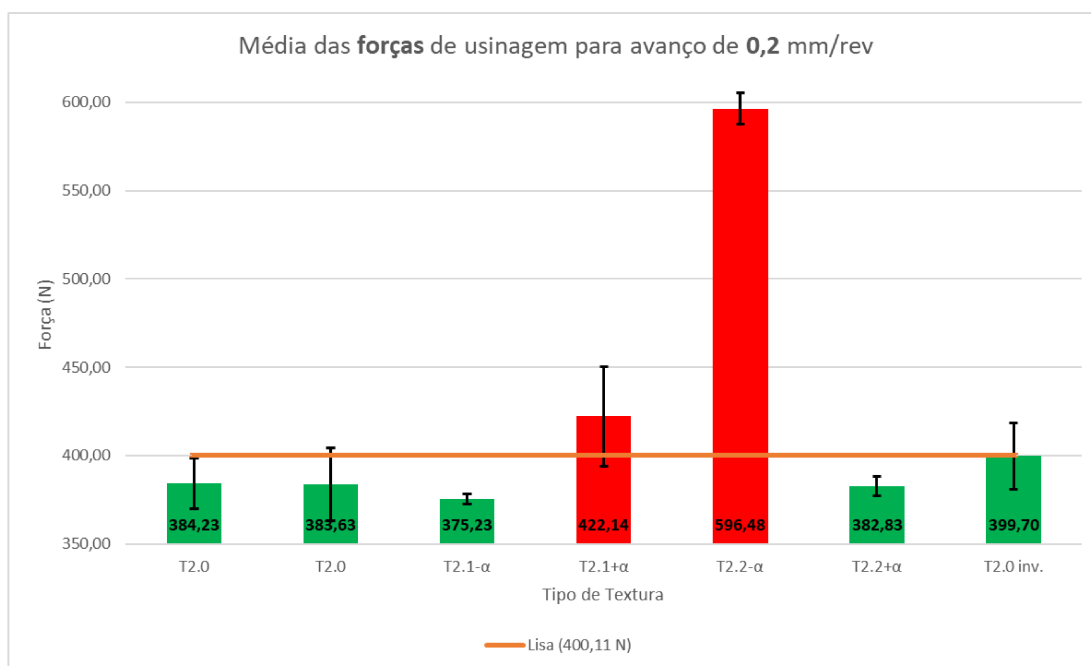


Figura 34 – Forças médias de usinagem obtidas para as diferentes geometrias de textura investigadas na Etapa 2, considerando um avanço de 0,2 mm/rev.

De maneira geral, observa-se que algumas configurações de textura apresentaram comportamento favorável, promovendo redução nas forças de usinagem quando comparadas à ferramenta convencional. Entre essas condições, destaca-se a textura T2.1-α, que apresentou o

menor valor médio de força entre as configurações analisadas. Esse resultado sugere que determinadas combinações geométricas envolvendo direção da ranhura e distância da textura em relação à aresta de corte podem contribuir para uma interação mais eficiente entre cavaco e ferramenta, reduzindo os esforços necessários para a remoção de material.

Por outro lado, algumas configurações de textura resultaram em forças significativamente superiores às observadas para a ferramenta lisa. O caso mais evidente corresponde à condição T2.2- α , que apresentou o maior valor médio de força de usinagem entre todas as condições avaliadas. Esse comportamento indica que determinadas combinações geométricas podem atuar de forma desfavorável na interface cavaco–ferramenta, possivelmente intensificando o atrito ou promovendo interferências no escoamento do cavaco sobre a superfície da ferramenta.

Esse aumento significativo de força pode estar associado à posição da textura em relação à aresta de corte ou à orientação das ranhuras, fatores que podem alterar de maneira significativa o regime de contato entre cavaco e ferramenta. Quando as ranhuras estão posicionadas em regiões onde ocorre a formação inicial do cavaco, ou quando sua orientação atua como uma barreira ao fluxo do material, pode ocorrer aumento da área real de contato e intensificação das forças de atrito. Em situações extremas, as ranhuras podem favorecer o aprisionamento de material dentro das cavidades da textura, reduzindo sua eficiência tribológica e resultando em maiores esforços de corte.

Além disso, observa-se que algumas condições apresentaram valores de força muito próximos entre si, como é o caso da textura T2.0, correspondente ao ponto central do planejamento experimental. Nessas condições, os resultados obtidos indicam comportamento relativamente estável, com valores de força ligeiramente inferiores aos observados para a ferramenta lisa. Esse comportamento sugere que essa configuração geométrica apresenta uma interação cavaco–ferramenta relativamente estável dentro das condições investigadas, não promovendo aumentos significativos de força, mas também não apresentando reduções tão expressivas quanto algumas das configurações mais favoráveis.

Outro aspecto importante observado nos resultados refere-se à variabilidade dos dados experimentais, representada pelas barras de dispersão presentes no gráfico. Em algumas condições texturizadas, observa-se maior dispersão nos valores de força medidos, o que pode estar associado a pequenas instabilidades no processo de formação do cavaco ou a variações no regime de contato cavaco-ferramenta. Esse comportamento é relativamente comum na usinagem da liga Ti6Al4V, material conhecido por apresentar cavaco segmentado, elevada

tendência à adesão e instabilidade na formação do cavaco, fatores que podem contribuir para flutuações nas forças de corte.

A Figura 35 apresenta uma análise complementar dos resultados, avaliando o efeito do avanço sobre a força média, mantendo-se fixa a geometria de textura correspondente à condição T2.0, a qual representa o ponto central do planejamento experimental. Nesse gráfico, são comparados os valores obtidos para a ferramenta texturizada e para a ferramenta lisa em três níveis distintos de avanço: 0,05 mm/rev, 0,20 mm/rev e 0,35 mm/rev.

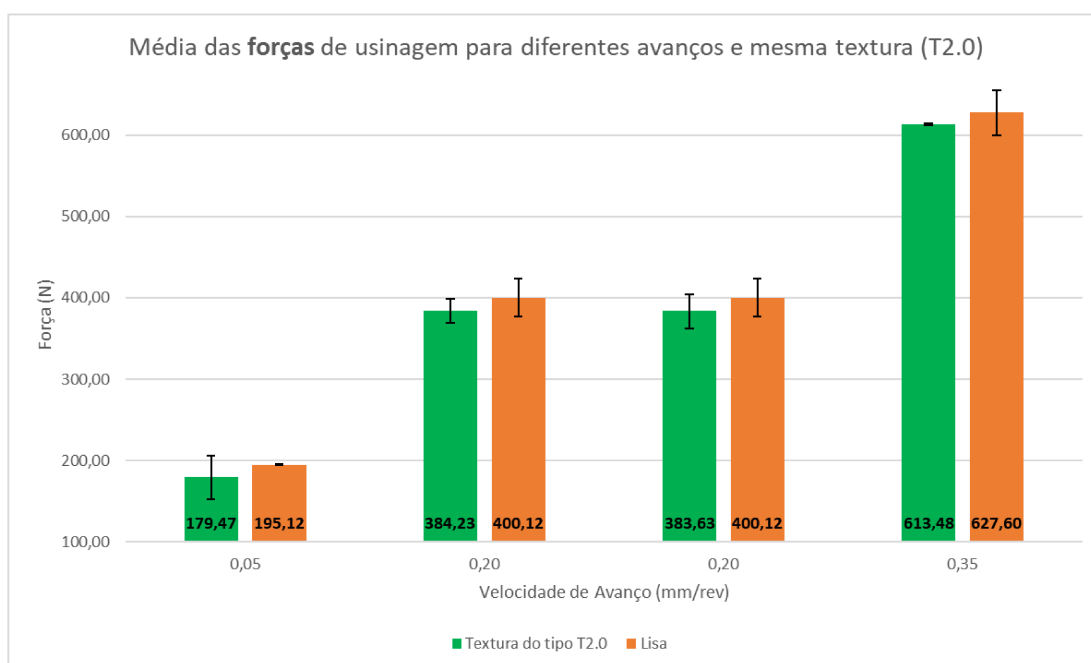


Figura 35 – Forças médias de usinagem em função do avanço para a textura T2.0 (ponto central do planejamento experimental), comparadas aos valores obtidos para a ferramenta lisa.

Observa-se claramente que o aumento do avanço resulta em crescimento significativo das forças de usinagem, comportamento esperado e amplamente documentado na literatura de usinagem, como visto nos livros de Machado et al. (2015), Diniz et al. (2006) e Trent e Wright (2000). O aumento do avanço está diretamente associado ao aumento da espessura do cavaco não deformado, o que implica maior volume de material sendo cisalhado por unidade de tempo. Como consequência, ocorre aumento da área de cisalhamento e da área de contato entre cavaco e ferramenta, resultando em maiores esforços mecânicos durante o processo de corte.

Apesar desse aumento geral das forças com o avanço, observa-se que a ferramenta texturizada do tipo T2.0 apresentou valores médios de força consistentemente inferiores aos obtidos com a ferramenta lisa em todas as condições de avanço analisadas. Para verificar

estatisticamente a influência da texturização sobre a força de usinagem, realizou-se uma análise de variância (ANOVA). Os resultados demonstraram que o efeito da textura foi estatisticamente significativo ($p < 0,05$), conforme mostrado na Figura 36. Além disso, o sinal negativo do efeito estimado indica que a presença da textura tende a reduzir a força de usinagem, corroborando os menores valores médios apresentados pela ferramenta T2.0 em todas as condições de avanço avaliadas. Esse comportamento indica que essa geometria de textura mantém sua eficiência tribológica mesmo sob diferentes regimes de carga de material removido, sugerindo que a presença das ranhuras na superfície de saída da ferramenta pode contribuir para a redução da área real de contato cavaco–ferramenta.

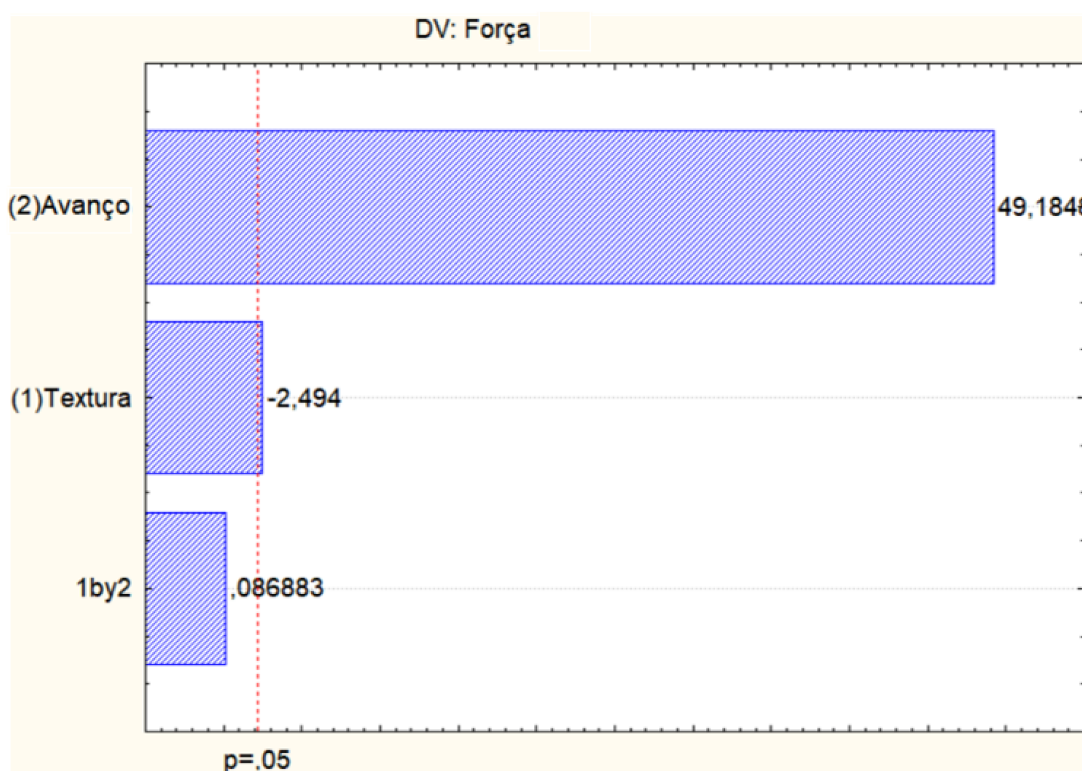


Figura 36 – Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados do avanço, da textura T2.0 e da interação entre esses fatores sobre a força de usinagem, considerando nível de significância de 5%. A textura tem $p < 0,05$, o que demonstra significância, e valor negativo, que demonstra que sua presença reduz a força de usinagem.

Uma possível explicação para esse comportamento está associada ao papel das ranhuras na modificação das condições de contato na interface de corte. As texturas podem atuar como micro-reservatórios capazes de reter detritos ou fluidos presentes no processo, além de promover pequenas discontinuidades na superfície de contato, reduzindo a área efetiva de

adesão entre cavaco e ferramenta. Esses efeitos podem contribuir para a diminuição do atrito na interface e, consequentemente, para a redução das forças de usinagem.

Outro aspecto relevante observado nesse conjunto de resultados é a consistência do desempenho da textura T2.0 ao longo da variação do avanço. Mesmo com o aumento significativo das forças de usinagem em avanços mais elevados, a diferença entre as forças obtidas com ferramenta texturizada e ferramenta lisa permanece relativamente constante. Esse comportamento sugere que a geometria correspondente ao ponto central do planejamento apresenta características geométricas equilibradas, capazes de atuar de forma eficiente em diferentes condições de usinagem.

4.2.4 Resultados de Rugosidade da Etapa 2

A Figura 37 apresenta os valores médios de rugosidade Ra obtidos para as diferentes geometrias de textura investigadas na Etapa 2, considerando um avanço de 0,2 mm/rev. De forma análoga ao procedimento adotado na análise das forças de usinagem, a linha horizontal presente no gráfico representa o valor médio de rugosidade obtido para a ferramenta lisa (sem textura), utilizada como referência para comparação. Barras em verde indicam condições em que a ferramenta texturizada resultou em redução da rugosidade média em relação à ferramenta lisa, enquanto barras em vermelho indicam condições nas quais ocorreu aumento da rugosidade superficial.

Observa-se, de maneira geral, que a maior parte das configurações de textura apresentou desempenho igual ou superior ao da ferramenta lisa, resultando em valores médios de rugosidade ligeiramente inferiores ao valor de referência. Entre as condições analisadas, destaca-se a textura T2.0 invertida, que apresentou o menor valor médio de rugosidade entre todas as condições avaliadas. Esse resultado sugere que a orientação das ranhuras pode exercer influência significativa sobre o escoamento do cavaco e sobre as condições tribológicas na interface cavaco-ferramenta, contribuindo para a obtenção de superfícies usinadas com melhor acabamento.

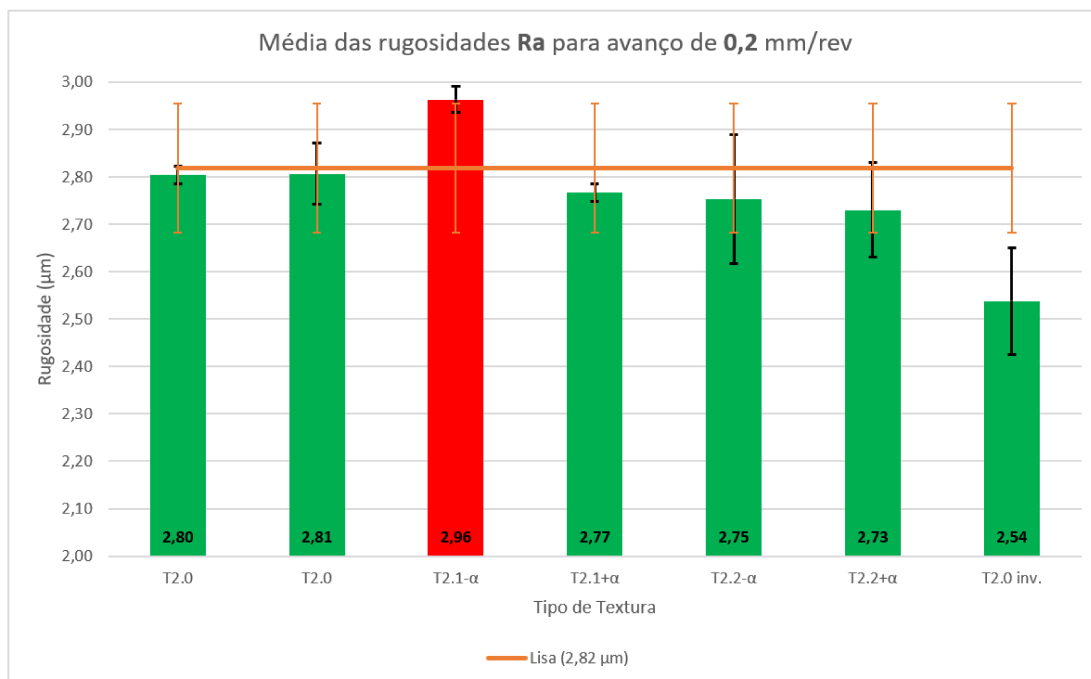


Figura 37 – Valores médios de rugosidade Ra obtidos para as diferentes geometrias de textura investigadas na Etapa 2, considerando avanço de 0,2 mm/rev. A linha horizontal representa o valor médio obtido com a ferramenta lisa, utilizada como referência para comparação.

Por outro lado, observa-se que a condição T2.1-α apresentou valor médio de rugosidade superior ao observado para a ferramenta lisa, sendo a única configuração que resultou em aumento significativo desse parâmetro. Esse comportamento indica que determinadas combinações geométricas de textura podem atuar de forma desfavorável no processo de formação da superfície usinada. Em particular, a orientação das ranhuras ou sua posição relativa em relação à aresta de corte pode interferir no escoamento do cavaco ou favorecer instabilidades no processo de corte, refletindo-se diretamente na qualidade superficial da peça.

As demais condições texturizadas apresentaram valores de rugosidade relativamente próximos entre si, com pequenas reduções em relação à ferramenta lisa. Esse comportamento sugere que, embora a texturização da superfície da ferramenta possa contribuir para a melhoria do acabamento superficial, o efeito da geometria da textura sobre esse parâmetro tende a ser mais sutil quando comparado aos efeitos observados sobre as forças de usinagem. Ainda assim, os resultados indicam uma tendência consistente de melhoria no acabamento superficial para a maioria das geometrias investigadas.

Outro aspecto relevante refere-se à dispersão dos valores de rugosidade observada nas barras de erro apresentadas no gráfico. Em algumas condições experimentais observa-se maior

variabilidade nos resultados, o que pode estar associado a pequenas instabilidades na formação do cavaco ou a variações nas condições de adesão do material usinado na superfície da ferramenta. Esse comportamento é frequentemente observado na usinagem da liga Ti6Al4V, material conhecido por apresentar cavaco segmentado, elevada tendência à adesão e formação de aresta postiça de corte, fatores que podem influenciar diretamente a qualidade superficial obtida após o processo de usinagem.

A Figura 38 apresenta uma análise complementar, avaliando a influência do avanço de usinagem sobre a rugosidade média R_a , mantendo-se fixa a geometria de textura correspondente à condição T2.0, que representa o ponto central do planejamento experimental. Nesse gráfico são comparados os valores obtidos para a ferramenta texturizada e para a ferramenta lisa em três níveis distintos de avanço: 0,05 mm/rev, 0,20 mm/rev e 0,35 mm/rev. Observa-se claramente que o aumento do avanço de usinagem resulta em elevação significativa da rugosidade superficial, comportamento amplamente documentado na literatura de processos de usinagem, como visto nos livros de Machado et al. (2015), Diniz et al. (2006) e Trent e Wright (2000). Esse efeito está diretamente relacionado ao aumento da altura teórica do perfil deixado pela ferramenta sobre a superfície da peça, uma vez que maiores valores de avanço implicam maiores distâncias entre as marcas sucessivas deixadas pela aresta de corte.

Para o menor avanço analisado (0,05 mm/rev), observa-se que ambos os tipos de ferramenta produziram superfícies com valores de rugosidade relativamente baixos, sendo a ferramenta texturizada ligeiramente superior em termos de acabamento superficial. À medida que o avanço aumenta para 0,20 mm/rev, os valores de rugosidade obtidos com ambas as ferramentas se tornam muito próximos, indicando que nessa condição o efeito da textura sobre o acabamento superficial tende a ser menos significativo.

No maior avanço investigado (0,35 mm/rev), observa-se aumento significativo da rugosidade para ambas as ferramentas, conforme esperado. Ainda assim, a ferramenta texturizada do tipo T2.0 apresentou valores de rugosidade ligeiramente inferiores aos obtidos com a ferramenta lisa, sugerindo que a presença da textura pode contribuir, ainda que de forma moderada, para a melhoria das condições de contato na interface cavaco–ferramenta mesmo em regimes mais severos de remoção de material.

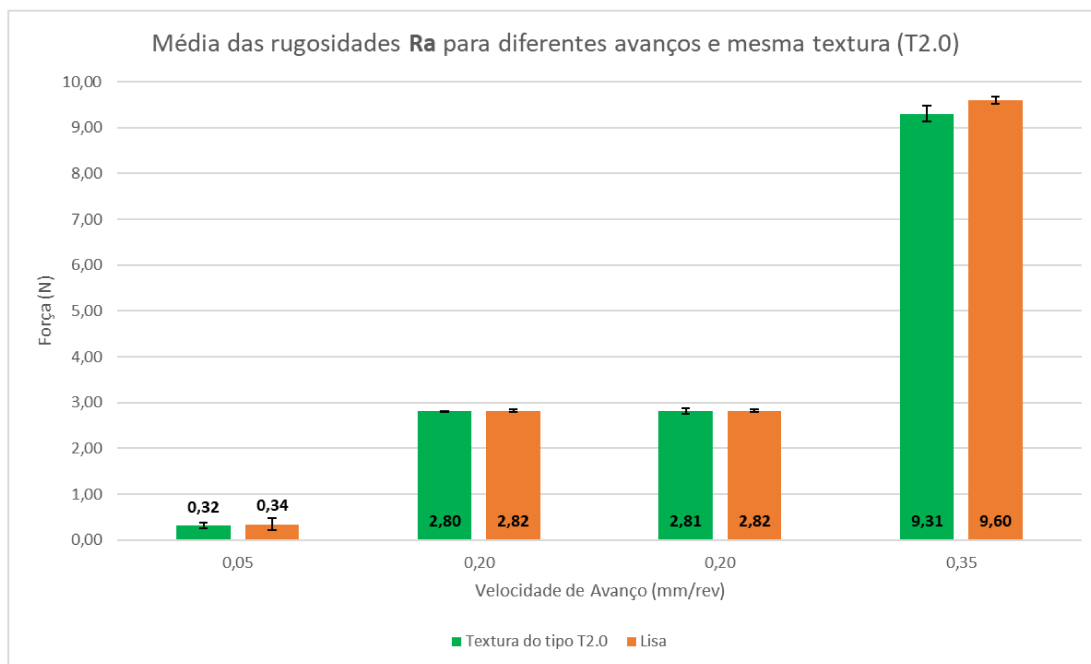


Figura 38 – Valores médios de rugosidade Ra em função do avanço de usinagem para a textura T2.0 (ponto central do planejamento experimental), comparados aos resultados obtidos com a ferramenta lisa.

Para verificar estatisticamente a influência da texturização sobre a rugosidade, realizou-se uma análise de variância (ANOVA). O efeito da textura não foi estatisticamente significativo ao nível de 5% ($p > 0,05$), não sendo possível afirmar estatisticamente que a texturização alterou a rugosidade, como mostrado na Figura 39. Entretanto, o sinal negativo do efeito estimado indica uma tendência de redução da rugosidade com o emprego da ferramenta texturizada.

Uma possível explicação para esse comportamento está associada à capacidade das ranhuras presentes na superfície da ferramenta de modificar as condições tribológicas na região de contato com o cavaco. Essas estruturas podem atuar como microdescontinuidades que reduzem a área real de contato entre cavaco e ferramenta, diminuindo a intensidade dos fenômenos de adesão e reduzindo as flutuações no processo de formação do cavaco. Como consequência, o processo de corte tende a ocorrer de maneira mais estável, refletindo-se em superfícies usinadas com menor irregularidade.

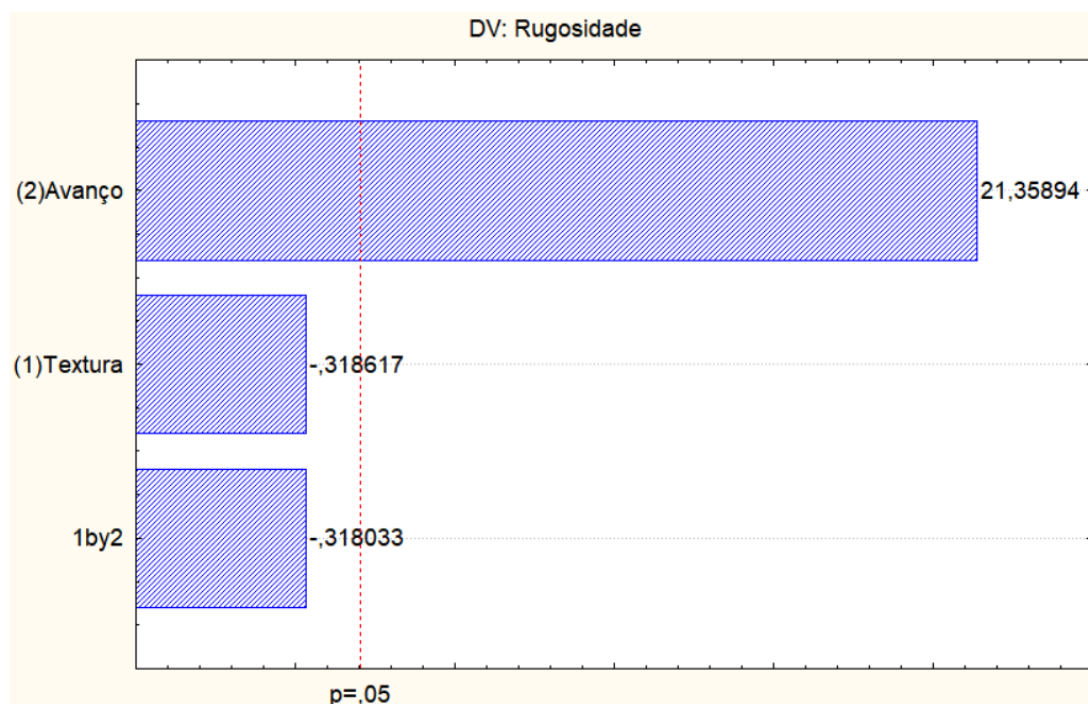


Figura 39 – Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados do avanço, da textura T2.0 e da interação entre esses fatores sobre a rugosidade, considerando nível de significância de 5%. Apesar da textura não ter atingido significância estatística, seu valor negativo demonstra que sua presença pode ter efeito de redução ou nulo sobre a rugosidade.

4.2.5 Resumo dos Resultados da Etapa 2

A fim de sintetizar os principais resultados obtidos na Etapa 2 do Planejamento Composto Central (PCC), o Quadro 8 apresenta a variação percentual das respostas do processo em relação à ferramenta lisa, utilizada como condição de referência. Nessa representação, valores positivos indicam redução da resposta analisada quando comparados à ferramenta convencional, enquanto valores negativos indicam aumento do parâmetro avaliado.

A partir da análise dos resultados apresentados, observa-se que diferentes geometrias de textura influenciam de maneira distinta as respostas do processo de usinagem. No que se refere à força de usinagem, verifica-se que a maioria das configurações texturizadas resultou em reduções moderadas desse parâmetro quando comparadas à ferramenta lisa. Entre as condições avaliadas, destacam-se as geometrias T2.0 e T2.1- α , que apresentaram reduções de aproximadamente 4% e 6%, respectivamente.

Variação do resultado em relação à uma ferramenta lisa (%)			
f (mm/rev)	Tipo	F (N)	Ra (μm)
0,2	T2.0	3,97	0,53
	T2.0	4,12	0,41
	T2.1- α	6,22	-5,14
	T2.1+ α	-5,51	1,83
	T2.2- α	-49,08	2,31
	T2.2+ α	4,32	3,13
0,05	T2.0- α	8,02	6,80
0,35	T2.0+ α	2,25	3,07

Quadro 8 – Variação percentual das respostas força de usinagem (F) e rugosidade média (Ra) em relação aos valores obtidos com a ferramenta lisa, para as diferentes configurações de textura avaliadas na Etapa 2.

Por outro lado, a condição T2.1+ α apresentou comportamento distinto, resultando em aumento da força de usinagem em relação à ferramenta convencional. Entretanto, o resultado mais expressivo foi observado para a configuração T2.2- α , que apresentou aumento significativo da força, indicando que determinadas combinações geométricas de textura podem atuar de forma desfavorável no processo de corte. Esse comportamento sugere que a posição e a orientação das ranhuras em relação à aresta de corte exercem influência direta sobre o regime de contato entre cavaco e ferramenta, podendo intensificar o atrito ou interferir no escoamento do cavaco.

Em relação ao parâmetro de rugosidade média (Ra), observou-se que a maioria das configurações texturizadas resultou em valores ligeiramente inferiores aos obtidos com a ferramenta lisa, indicando potencial benefício da texturização na melhoria do acabamento superficial. Entre os resultados obtidos, destaca-se novamente a geometria T2.0, que apresentou reduções consistentes de rugosidade, evidenciando comportamento relativamente estável dessa configuração geométrica.

Entretanto, observa-se que a configuração T2.1- α apresentou aumento da rugosidade em relação à ferramenta lisa, comportamento que pode estar associado a instabilidades no processo de formação do cavaco ou a alterações no regime de contato entre cavaco e ferramenta provocadas pela orientação específica das ranhuras.

Diversos trabalhos também investigaram geometrias inclinadas ou orientadas em ângulos intermediários em relação à aresta de corte e ao fluxo do cavaco. Essas texturas podem ser consideradas configurações intermediárias entre as orientações paralela e perpendicular, às

vezes com exatos 45° como neste presente trabalho, e/ou valores próximos. Assim, a seguir são apresentados os principais resultados encontrados na literatura sobre a influência de texturas inclinadas nos valores de força de usinagem e rugosidade superficial.

Em relação às forças de corte, os estudos que avaliaram texturas inclinadas ou orientadas em ângulos intermediários demonstraram que a inclinação dos *grooves* altera significativamente o comportamento tribológico da interface cavaco-ferramenta. Lian, Chen e Mu (2019) compararam texturas normais e inclinadas, observando que as texturas inclinadas apresentaram menor aderência de material e menor entupimento em altas velocidades de corte, favorecendo a estabilidade do processo de usinagem. Sivaiah e Bodicherla (2020) avaliaram *grooves* inclinados (45° , mas sentido não apresentado) em relação à aresta principal de corte e verificaram redução do atrito, menor formação de aresta postiça e menores esforços atuantes durante a usinagem. De forma semelhante, trabalhos que investigaram orientações angulares intermediárias e *grooves* cruzados mostraram que a inclinação das texturas modifica o escoamento do cavaco e reduz a área efetiva de contato entre ferramenta e material usinado, contribuindo para redução das forças de corte e melhoria do comportamento tribológico. De maneira geral, os autores relatam que texturas inclinadas podem combinar características das geometrias paralelas e perpendiculares, promovendo simultaneamente melhor direcionamento do cavaco e redução do atrito na interface de corte.

Quanto à rugosidade superficial, os trabalhos envolvendo texturas inclinadas também demonstraram influência significativa da orientação angular sobre a qualidade da superfície usinada. Sivaiah e Bodicherla (2020) observaram que *grooves* inclinados a 45° proporcionaram menor rugosidade superficial e menor desgaste da ferramenta quando comparados às demais orientações avaliadas, associando esse comportamento à redução da adesão de material e à melhoria do escoamento do cavaco. Os autores destacam ainda que a orientação angular das texturas modifica a direção de escoamento do cavaco sobre a superfície da ferramenta, influenciando diretamente a estabilidade tribológica da interface e, consequentemente, os valores de rugosidade obtidos.

Embora poucos estudos tenham avaliado diretamente a influência de texturas inclinadas sobre força de usinagem e rugosidade superficial, a literatura apresenta diversos trabalhos com foco em geometrias angulares e orientações intermediárias entre as configurações paralela e perpendicular. Entretanto, em muitos desses estudos, os principais resultados estão relacionados ao desgaste da ferramenta, comportamento tribológico e escoamento do cavaco, e não especificamente aos valores de força ou acabamento superficial.

Além da análise das variações médias das respostas, é importante considerar também a repetibilidade dos resultados experimentais, a qual pode ser avaliada por meio do coeficiente de variação percentual. O Quadro 9 apresenta os valores de coeficiente de variação obtidos para as respostas força e rugosidade nas diferentes condições experimentais analisadas.

Coeficiente de Variação Percentual (%)			
f (mm/rev)	Tipo	F	Ra
0,2	T2.0	3,77	1,51
	T2.0	5,39	0,66
	T2.1-α	0,78	0,92
	T2.1+α	6,66	1,89
	T2.2-α	1,48	4,94
	T2.2+α	1,44	3,67
0,05	T2.0-α	14,76	18,96
0,35	T2.0+α	0,16	1,82

Quadro 9 – Coeficiente de variação percentual das respostas força de usinagem (F) e rugosidade média (Ra) para as diferentes condições experimentais da Etapa 2.

De modo geral, valores reduzidos de coeficiente de variação indicam boa repetibilidade do processo experimental. Neste trabalho, foi adotado como critério que coeficientes de variação inferiores a 20% indicam estabilidade suficiente dos resultados, descartando a necessidade de realização de réplicas adicionais dos ensaios. Dessa forma, essa análise serve como uma verificação da confiabilidade experimental dos dados obtidos na Etapa 2. Para os ensaios realizados com avanço de 0,2 mm/rev, os coeficientes de variação permaneceram, em sua maioria, abaixo de 7%, tanto para força quanto para rugosidade, o que sugere adequada estabilidade do processo de usinagem nessas condições.

Entretanto, observa-se maior variabilidade nos ensaios realizados com avanço de 0,05 mm/rev, especialmente para a resposta de rugosidade, condição na qual foram observados coeficientes de variação mais elevados. Esse comportamento pode estar associado à maior sensibilidade do processo de formação da superfície usinada em condições de avanço reduzido, nas quais pequenas variações no regime de corte podem resultar em diferenças mais significativas na topografia da superfície gerada. Por outro lado, para o avanço mais elevado investigado (0,35 mm/rev), observa-se novamente redução nos coeficientes de variação, indicando comportamento relativamente estável das respostas do processo nessa condição.

4.2.6 Preparação para a Etapa 3

Com base nos resultados experimentais obtidos na Etapa 2 do Planejamento Composto Central (PCC), foi realizada uma etapa de otimização da geometria da textura, com o objetivo de identificar a combinação de parâmetros capaz de minimizar simultaneamente as respostas de força de usinagem (F) e rugosidade média da superfície (R_a). Para essa análise, foram utilizados modelos estatísticos obtidos a partir do planejamento experimental, e as superfícies de resposta correspondentes foram geradas com o auxílio do software Statistica.

Foram analisados os perfis dos valores preditos para as respostas do processo (Figura 40), os quais permitem avaliar a tendência de variação da força de usinagem e da rugosidade em função dos fatores investigados: direção da textura, distância da textura em relação à aresta de corte e avanço de usinagem.

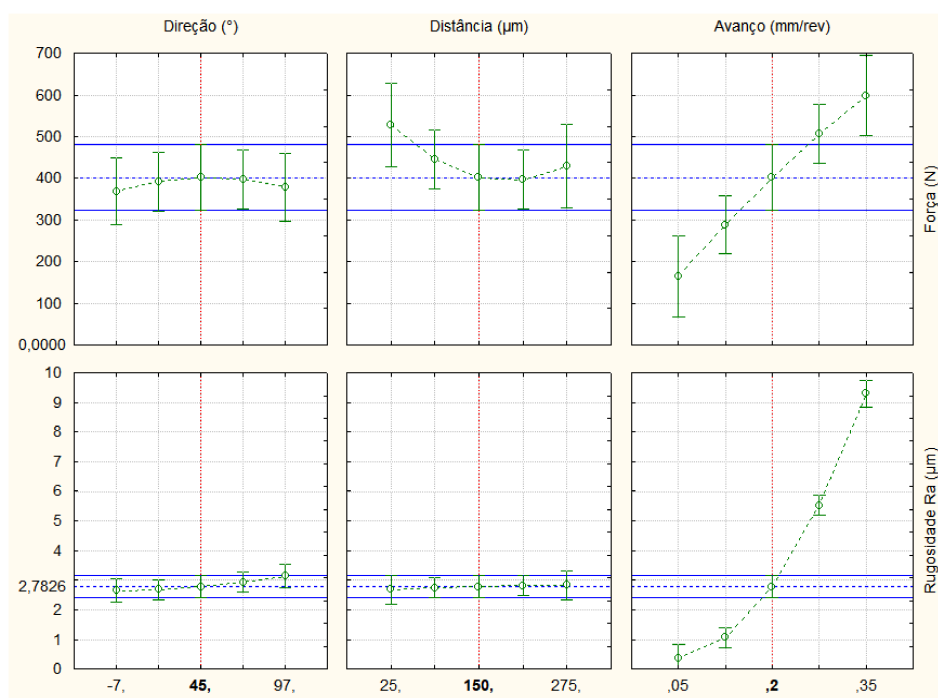


Figura 40 – Perfis dos valores preditos para as respostas força de usinagem (F) e rugosidade média (R_a) em função dos fatores direção da textura, distância da textura e avanço de usinagem. A linha vermelha corresponde ao ponto central da variável. As linhas verdes tracejadas representam os valores preditos pelo modelo estatístico para cada nível dos fatores avaliados, enquanto as barras verdes verticais indicam os respectivos intervalos de confiança associados às predições. A linha azul tracejada central corresponde à média global da variável resposta, e as linhas azuis contínuas superior e inferior representam a faixa de confiança em torno dessa média.

Observa-se que o avanço exerce a maior influência sobre ambas as respostas analisadas. À medida que o avanço aumenta, ocorre um crescimento significativo tanto da força de usinagem quanto da rugosidade superficial. Esse comportamento está diretamente relacionado ao aumento da espessura do cavaco não deformado, o que eleva os esforços envolvidos no processo de corte e a altura teórica das irregularidades geradas na superfície usinada.

Por outro lado, os fatores direção da textura e distância da textura em relação à aresta de corte apresentaram influência menos pronunciada quando comparados ao avanço, embora ainda desempenhem papel relevante na determinação das condições de contato entre cavaco e ferramenta. Em determinadas combinações desses parâmetros, observa-se redução tanto da força de usinagem quanto da rugosidade superficial, indicando a existência de regiões favoráveis dentro do domínio experimental investigado.

Para aprofundar essa análise, foram construídas superfícies de resposta tridimensionais, permitindo avaliar simultaneamente a influência de dois fatores sobre cada uma das respostas do processo.

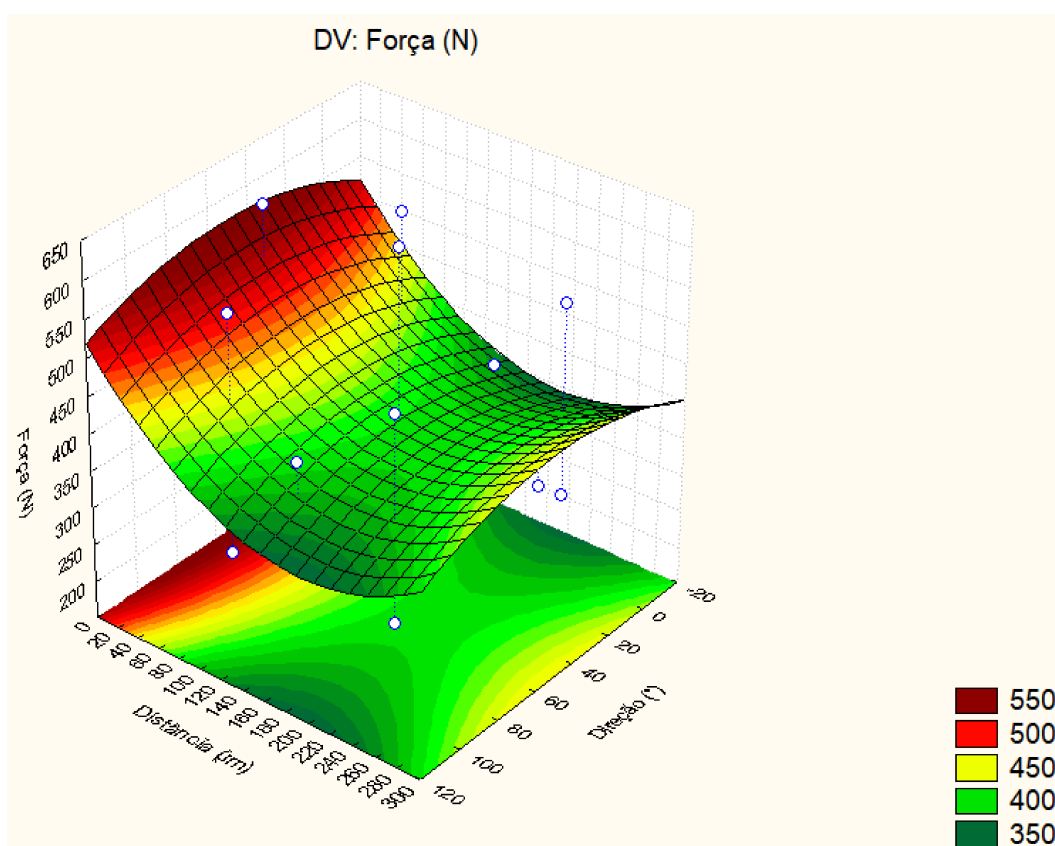


Figura 41 – Superfície de resposta da força de usinagem em função da distância da primeira textura em relação à aresta de corte e da direção da textura.

A partir dessa representação vista na Figura 41, observa-se que a força de usinagem apresenta duas regiões mínimas localizadas o mais distante do valor do ponto central (45°) para a direção, e valores intermediários próximos a $200\ \mu\text{m}$ para a distância. Esse comportamento sugere que orientações levemente inclinadas da textura em relação ao fluxo do cavaco podem favorecer a redução dos esforços de corte, possivelmente devido à modificação das condições de contato na interface cavaco-ferramenta.

A análise correspondente para a rugosidade superficial é apresentada na Figura 42, que mostra a superfície de resposta da rugosidade média (R_a) em função desses mesmos parâmetros.

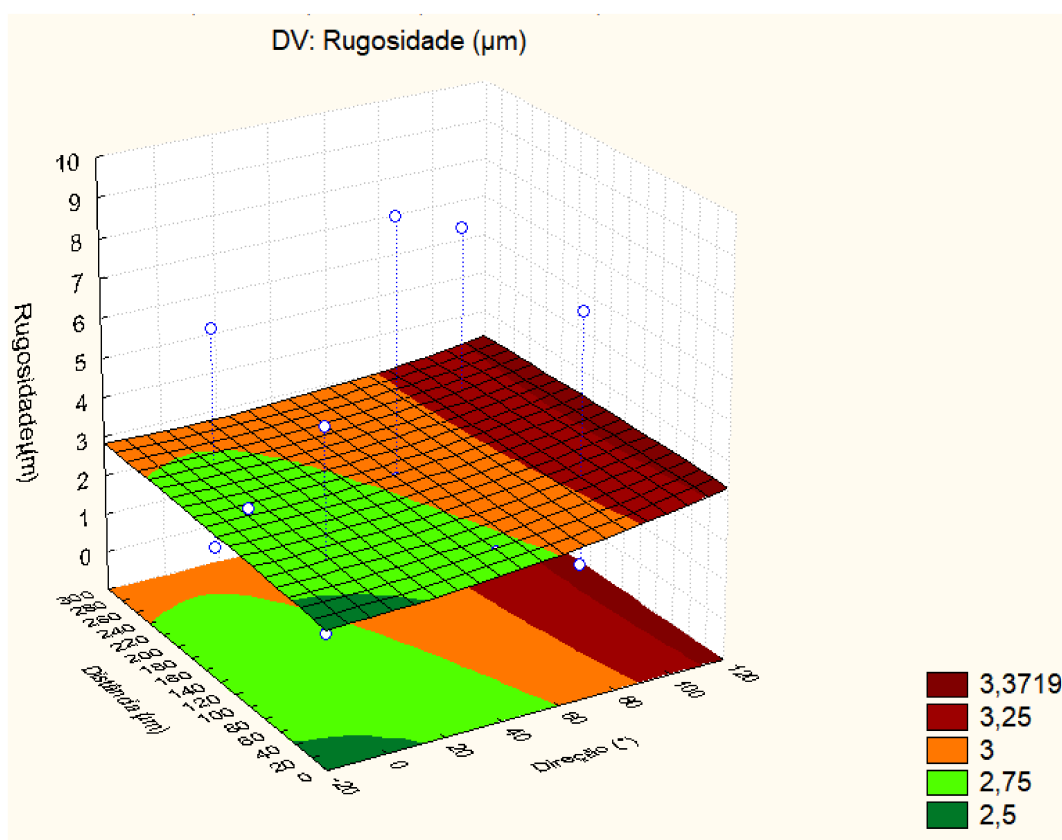


Figura 42 – Superfície de resposta da rugosidade média (R_a) em função da distância da primeira textura em relação à aresta de corte e da direção da textura.

Observa-se que os menores valores de rugosidade se concentram em uma única região de valores mínimos para ambas as variáveis, a qual coincide também com uma das regiões de ótimo encontradas para as forças de usinagem para esses mesmos parâmetros. Ou seja, esta região é potencialmente favorável para a otimização simultânea das duas respostas. Além disso,

valores intermediários da distância da textura tendem a proporcionar menores valores de rugosidade superficial.

A análise conjunta de todas as superfícies de resposta indica que o ponto ótimo obtido pelo modelo estatístico corresponde aproximadamente a uma direção de -7° e uma distância de $212\text{ }\mu\text{m}$ em relação à aresta de corte. Estes valores foram calculados conforme a definição do ponto X_α , determinada de acordo com a Equação 4, conforme descrito na Subseção 4.2.1.

Entretanto, considerando aspectos práticos relacionados à fabricação das ferramentas texturizadas, foram realizados pequenos ajustes nesses valores. Como o valor de -7° encontra-se muito próximo de 0° , optou-se por arredondar esse parâmetro para 0° , facilitando o alinhamento da textura durante o processo de fabricação.

De forma semelhante, o valor de $212\text{ }\mu\text{m}$ para a distância da textura foi arredondado para $200\text{ }\mu\text{m}$, valor mais conveniente do ponto de vista de fabricação e posicionamento da textura.

Dessa forma, com base na análise das superfícies de resposta e considerando aspectos práticos de fabricação, definiu-se como geometria otimizada da textura os seguintes parâmetros:

- Direção da textura: 0°
- Distância da textura em relação à aresta de corte: $200\text{ }\mu\text{m}$

Esses parâmetros foram posteriormente utilizados na fabricação das ferramentas texturizadas empregadas na etapa de validação experimental da geometria otimizada, apresentada na seção seguinte.

4.3 Etapa 3

Na Etapa 3 do estudo, foi realizada a comparação entre a ferramenta texturizada com geometria otimizada e uma ferramenta convencional sem textura, considerando como variáveis de saída a força de usinagem (F_u), a rugosidade (R_a) e a vida da ferramenta de corte (T), com o objetivo de avaliar os ganhos efetivos proporcionados pela aplicação da microtexturização na superfície de saída de ferramenta de corte. Considerando que, nas análises anteriores, o avanço de usinagem se mostrou o fator de maior influência sobre as respostas do processo, especialmente na força de usinagem e na rugosidade superficial, optou-se por avaliar o desempenho das ferramentas em duas condições distintas de corte, representativas de operações industriais: desbaste e acabamento. Dessa forma, buscou-se investigar o comportamento da textura otimizada em diferentes regimes de usinagem, permitindo analisar sua eficiência tanto em condições de maior remoção de material quanto em situações em que a qualidade superficial

da peça é o principal requisito. Esses resultados permitiram avaliar a robustez da geometria de textura definida nas etapas anteriores e sua aplicabilidade prática no processo de usinagem.

4.3.1 Planejamento da Etapa 3

Após a definição da geometria otimizada da textura nas etapas anteriores, a Etapa 3 do estudo foi dedicada à avaliação comparativa entre a ferramenta texturizada otimizada e uma ferramenta convencional sem textura, com o objetivo de verificar os ganhos efetivos proporcionados pela microtexturização da superfície da ferramenta em condições representativas de usinagem.

A geometria da textura utilizada nesta etapa corresponde à configuração otimizada obtida a partir da análise das superfícies de resposta do planejamento experimental anterior. Os parâmetros geométricos da textura empregada são apresentados na Tabela 8, incluindo profundidade, largura, espaçamento, distância da aresta de corte e orientação da textura.

Tabela 8 – Parâmetros geométricos da textura otimizada utilizada na Etapa 3.

Parâmetro da Textura Ótima	Valor
Profundidade	20 μm
Largura	40 μm
Espaçamento	40 μm
Distância da Aresta de Corte	200 μm
Direção	0° (paralela)

A partir dos resultados obtidos nas etapas anteriores, verificou-se que o avanço exerce forte influência sobre as respostas do processo, especialmente sobre a força de usinagem e a rugosidade superficial. Dessa forma, optou-se por avaliar o desempenho das ferramentas em duas condições distintas de usinagem, representativas de operações industriais: desbaste e acabamento. Os parâmetros de torneamento adotados para cada uma dessas condições são apresentados na Tabela 9.

A condição de desbaste foi definida com parâmetros que favorecem maior taxa de remoção de material, utilizando profundidade de corte de 1 mm, velocidade de corte de 70 m/min e avanço de 0,3 mm/rev. Já a condição de acabamento foi definida com parâmetros mais brandos, visando melhor qualidade superficial, utilizando profundidade de corte de 0,5 mm, velocidade de corte de 100 m/min e avanço de 0,1 mm/rev.

Tabela 9 – Parâmetros de corte utilizados nas operações de desbaste e acabamento na Etapa 3.

Parâmetro de Corte	Valores para Acabamento	Valores para Desbaste
Velocidade de Corte (V_c)	100 m/min	70 m/min
Avanço (f)	0,1 mm/rev	0,3 mm/rev
Profundidade (a_p)	0,5 mm	1 mm

Com base nos parâmetros de usinagem adotados, foi realizada uma estimativa do comprimento de contato cavaco–ferramenta (L_c) para as condições de acabamento e desbaste. Essa estimativa foi baseada em uma aproximação utilizada na literatura de usinagem, segundo a qual o comprimento de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta é da ordem de 2,5 vezes a espessura não deformada do cavaco, podendo aproximadamente dobrar com a evolução do desgaste da ferramenta. Assim, adotou-se como referência uma faixa aproximada de 2,5 a 5 vezes a espessura não deformada do cavaco (Tönshoff e Denkena, 2013). Embora essa relação não represente um modelo exato, ela é frequentemente empregada para estimativas preliminares da região de interação cavaco–ferramenta, especialmente em análises tribológicas e estudos envolvendo texturização de ferramentas. No torneamento com ângulo de posição próximo de 90° , a espessura não deformada do cavaco pode ser aproximada pelo próprio avanço utilizado no processo. Dessa forma, para a condição de acabamento, utilizando avanço de 0,1 mm/rev, estimou-se um comprimento de contato entre aproximadamente 0,2 e 0,5 mm. Já para a condição de desbaste, com avanço de 0,3 mm/rev, o comprimento estimado variou entre aproximadamente 0,6 e 1,5 mm.

Ressalta-se ainda que a usinagem da liga Ti6Al4V apresenta formação característica de cavaco segmentado, fenômeno associado à ocorrência de bandas de cisalhamento adiabático durante o corte. Esse comportamento pode provocar variações locais na região de contato entre cavaco e ferramenta, tornando o comprimento efetivo de contato menos uniforme quando comparado a materiais que apresentam cavaco contínuo. Dessa forma, os valores estimados para L_c devem ser interpretados como aproximações teóricas destinadas à análise preliminar da região potencial de atuação da texturização sobre a interface cavaco–ferramenta.

Considerando que a texturização da ferramenta se inicia a 0,2 mm da aresta de corte, observa-se que, na condição de acabamento, cuja região estimada de contato varia entre 0,2 e 0,5 mm, a textura pode atuar aproximadamente entre 0 e 60% do comprimento total de contato cavaco–ferramenta. Isso indica que, dependendo da extensão efetiva da zona de contato durante o corte, parte significativa da interação cavaco-ferramenta pode ocorrer antes da região

texturizada. Em contrapartida, na condição de desbaste, cujo comprimento estimado de contato varia entre 0,6 e 1,5 mm, a textura tende a atuar de maneira mais efetiva, abrangendo aproximadamente entre 65 e 85% da região total de contato estimada. Dessa forma, espera-se maior influência da texturização sobre o escoamento do cavaco, atrito e condições tribológicas da interface ferramenta–cavaco durante a condição de desbaste.

O planejamento experimental desta etapa foi estruturado segundo um planejamento fatorial completo 2^3 , permitindo avaliar a influência de três fatores principais sobre as respostas do processo: presença de textura na ferramenta, condição de usinagem (desbaste ou acabamento) e presença de lubrificante sólido nas texturas.

O arranjo completo das condições experimentais é apresentado no Quadro 10, totalizando oito condições experimentais. Nesse planejamento, cada fator assume dois níveis, possibilitando avaliar não apenas os efeitos individuais de cada variável, mas também possíveis interações entre elas.

ETAPA 3: Fatorial Completo 2^3			
Variáveis de Saída: Força, Rugosidade e Vida			
Nº de condições	Textura Otimizada x Lisa		
	PRESENÇA DE TEXTURA	VELOCIDADE DE CORTE	PRESENÇA DE MoS2
1	Lisa	Acabamento	-
2	Texturizada	Acabamento	Sem
3	Lisa	Desbaste	-
4	Texturizada	Desbaste	Sem
5	Lisa	Acabamento	-
6	Texturizada	Acabamento	MoS2
7	Lisa	Desbaste	-
8	Texturizada	Desbaste	MosS2

Quadro 10 – Planejamento experimental da Etapa 3 – fatorial completo 2^3 .

Cabe destacar que a aplicação do lubrificante sólido MoS_2 foi realizada exclusivamente nas ferramentas texturizadas, uma vez que as microcavidades da textura permitem o armazenamento e retenção desse material, atuando como reservatórios tribológicos durante o processo de usinagem. Dessa forma, nas condições em que foram utilizadas ferramentas sem textura, não houve possibilidade de aplicar o lubrificante sólido.

Esse planejamento experimental possibilitou avaliar de forma sistemática o efeito da texturização da ferramenta, bem como o potencial benefício da combinação entre textura superficial e lubrificação sólida, em diferentes regimes de usinagem, representados pelas operações de desbaste e acabamento.

4.3.2 Texturas Produzidas na Etapa 3

A produção das texturas utilizadas na Etapa 3 foi realizada com base nos parâmetros geométricos definidos na etapa de otimização conduzida por meio do Planejamento Composto Central (PCC).

A representação esquemática da geometria da textura aplicada nas ferramentas é apresentada na Figura 43, na qual se observa o arranjo dos microcanais com os parâmetros geométricos definidos após a etapa de otimização.

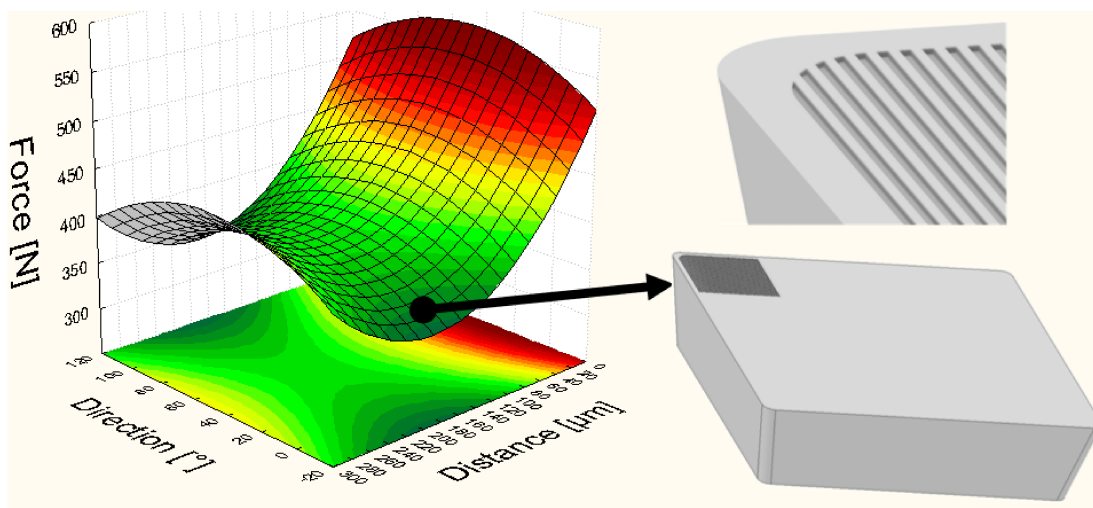


Figura 43 – Desenho da textura com geometria otimizada obtida após a conclusão do Planejamento Composto Central (PCC). A imagem, mostra a região da superfície de resposta equivalente para a textura ótima.

A fim de verificar a qualidade das texturas produzidas, foram realizadas análises de perfilometria da superfície das ferramentas texturizadas. Essas medições permitiram avaliar a profundidade, a largura e a uniformidade das microestruturas geradas pelo processo de texturização a laser.

Os resultados obtidos demonstraram que o processo de fabricação foi bem-sucedido, apresentando boa concordância entre as dimensões projetadas e aquelas efetivamente obtidas na superfície da ferramenta. As imagens de perfilometria evidenciam a regularidade das microestruturas e a precisão do processo de fabricação, confirmando a capacidade do laser de femtossegundos em produzir geometrias com elevada definição e controle dimensional.

As imagens obtidas por perfilometria são apresentadas na Figura 44 (3D) e Figura 45 (seção transversal), nas quais é possível observar o perfil dos microcanais produzidos e a uniformidade das texturas ao longo da superfície analisada.

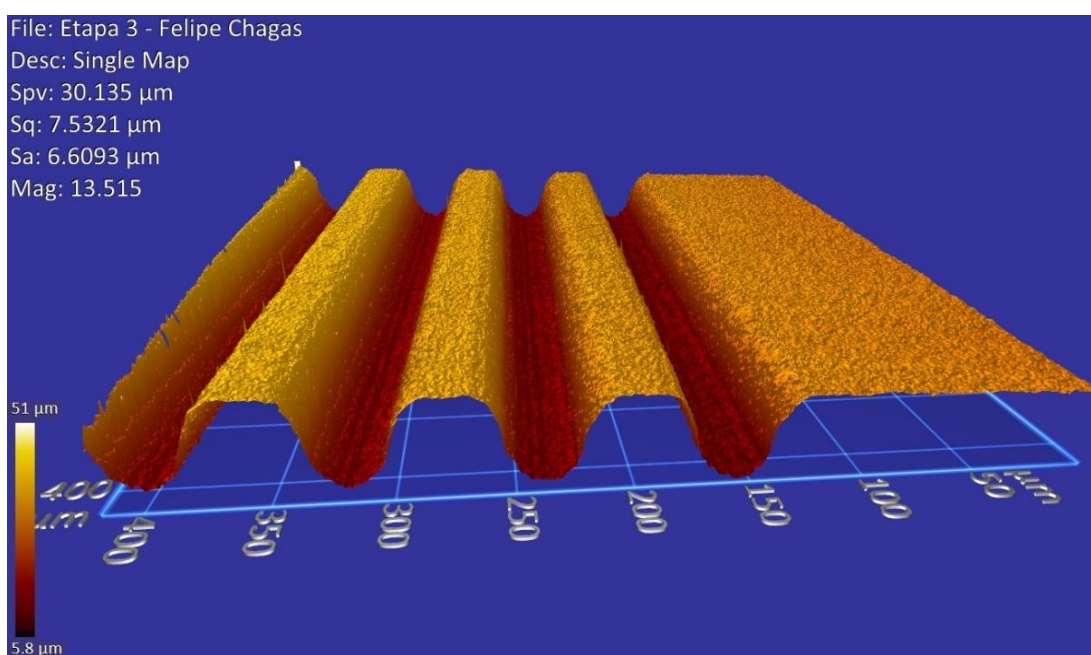


Figura 44 – Imagens de perfilometria 3D das texturas produzidas.

As texturas foram projetadas com profundidade de 20 μm , largura de 40 μm e espaçamento de 40 μm entre sulcos adjacentes. De maneira geral, os resultados de perfilometria indicaram boa repetibilidade e uniformidade das estruturas produzidas, evidenciando a capacidade do processo de texturização em reproduzir a geometria definida no projeto.

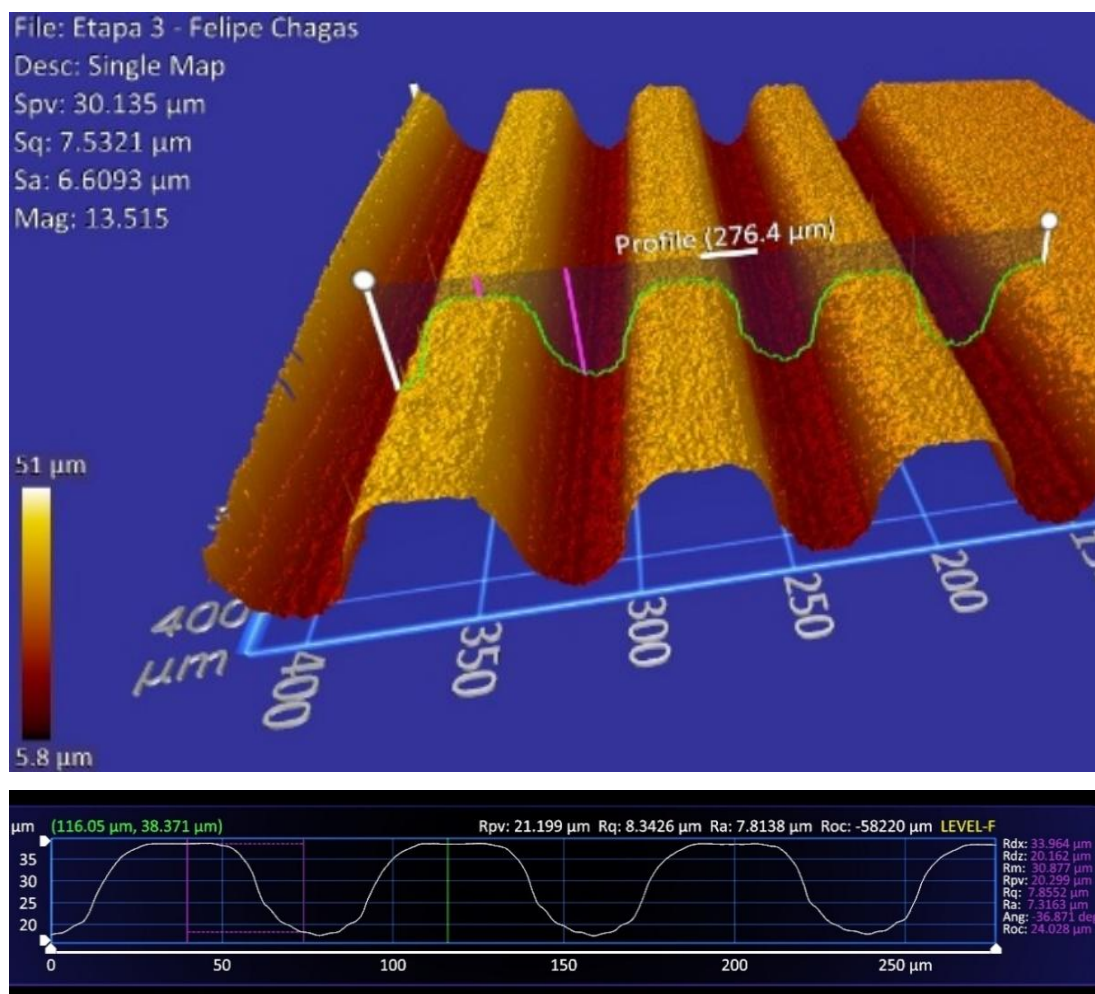


Figura 45 – Imagens de perfilometria 2D das texturas produzidas. Rdz corresponde à profundidade. Largura e Espaçamento são observados em medições no software. Os valores correspondem à Tabela 8.

A análise das seções transversais das texturas mostrou que o perfil dos sulcos não apresenta geometria perfeitamente retangular ao longo de toda a profundidade. Observa-se que a abertura do sulco inicia próxima ao valor projetado na superfície e tende a se afunilar gradualmente em direção ao fundo da textura. Além disso, a profundidade máxima é normalmente atingida na região central do sulco, característica típica de processos de ablação a laser.

Os mapas tridimensionais obtidos por perfilometria também permitiram avaliar a uniformidade das texturas ao longo das áreas analisadas. Nesses mapas é possível identificar claramente a distribuição regular dos sulcos e a consistência geométrica entre as diferentes regiões da superfície texturizada. De modo geral, as imagens evidenciam a elevada qualidade das texturas produzidas pelo laser de femtossegundos.

Outro aspecto observado nas análises refere-se às pequenas variações geométricas próximas às extremidades dos sulcos. Em algumas regiões, nota-se um leve aumento da profundidade ao final do percurso de texturização, fenômeno associado às características do movimento do feixe laser durante o término do passe. Nesse momento, ocorre uma breve desaceleração do deslocamento do feixe para reposicionamento no próximo trajeto, o que pode resultar em maior deposição de energia local e, conseqüentemente, em uma ligeira ampliação da profundidade da textura.

4.3.3 Resultados de Força da Etapa 3

A análise das forças de usinagem foi realizada com o objetivo de avaliar a influência da presença de texturas na superfície da ferramenta e da utilização de lubrificante sólido nas microranhuradas da textura. Os ensaios foram conduzidos em duas condições de corte distintas, representando operações de acabamento e desbaste, permitindo avaliar o comportamento das diferentes configurações de ferramenta em regimes de usinagem com diferentes níveis de solicitação mecânica. Os testes de forças foram realizados separadamente, e não concomitantemente com os testes de vida.

Os resultados médios das forças de usinagem são apresentados na Figura 46, na qual são comparadas as três condições de ferramenta avaliadas: ferramenta lisa, ferramenta texturizada sem lubrificante sólido e ferramenta texturizada com aplicação de MoS₂ nas microtexturas.

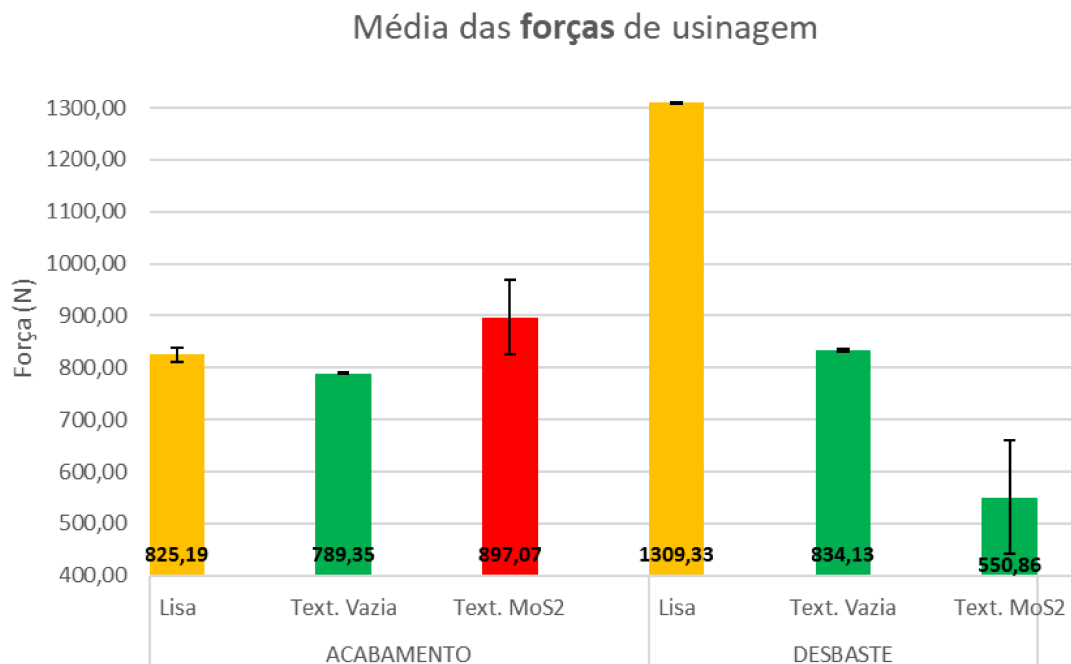


Figura 46 – Média das forças de usinagem para ferramentas lisa, texturizada sem lubrificante sólido e texturizada com MoS₂, nas condições de acabamento e desbaste.

Na condição de acabamento, observa-se que a ferramenta lisa apresentou força média de 825,19 N, enquanto a ferramenta texturizada sem lubrificante sólido apresentou um valor ligeiramente inferior, de 789,35 N (redução de aproximadamente 4,3%). Esse resultado indica que a presença das microtexturas pode contribuir para uma pequena redução da força de usinagem, possivelmente devido à alteração das condições tribológicas na interface cavaco-ferramenta. Por outro lado, quando foi utilizado lubrificante sólido MoS₂ nas texturas, a força média observada foi de 897,07 N (aumento de aproximadamente 8,7%), valor superior às demais condições avaliadas nesta condição de corte. No entanto, ao considerar as barras de erro, torna-se evidente que alguns testes individuais dentro dessa condição superaram a ferramenta sem textura. Em média, porém, os resultados foram menos favoráveis. Essa variabilidade pode ser atribuída às altas velocidades de corte características das operações de acabamento, que podem ter levado ao esgotamento rápido e completo do lubrificante sólido. A transição abrupta de um estado lubrificado para um não lubrificado pode ter interrompido a dinâmica do fluxo de cavacos, afetando negativamente o processo de corte.

Na condição de desbaste, os efeitos da texturização tornam-se mais pronunciados. A ferramenta lisa apresentou a maior força média, de 1309,33 N. A ferramenta texturizada sem lubrificante sólido apresentou redução significativa desse valor, com força média de 834,13 N (redução de aproximadamente 36,3%). A maior redução foi observada na ferramenta

texturizada com MoS_2 , que apresentou força média de 550,86 N (redução de aproximadamente 57,9%), indicando que a combinação entre texturização e lubrificação sólida pode contribuir significativamente para a redução das forças de corte em condições de usinagem mais severas.

Esse comportamento pode estar associado à redução da área real de contato entre cavaco e ferramenta promovida pelas microtexturas, bem como à capacidade das cavidades de armazenar lubrificante sólido, o que pode reduzir o atrito na interface de contato e facilitar o escoamento do cavaco. Em condições de desbaste, nas quais as forças e temperaturas envolvidas no processo são mais elevadas, esses efeitos tornam-se mais relevantes, resultando em reduções mais expressivas das forças de usinagem.

Os resultados obtidos neste trabalho apresentam boa concordância com diversos estudos encontrados na literatura que investigaram o efeito da texturização de ferramentas na usinagem da liga Ti6Al4V. De maneira geral, a maioria dos trabalhos reporta reduções nas forças de corte associadas à presença de microtexturas na superfície da ferramenta, especialmente quando combinadas com estratégias que melhoram as condições de lubrificação ou reduzem a área de contato cavaco–ferramenta.

Resultados semelhantes foram observados por Hao et al. (2018), que estudaram ferramentas texturizadas com propriedades de molhabilidade diferenciadas. Os autores verificaram redução das forças de corte e do coeficiente médio de atrito durante o torneamento da liga Ti6Al4V utilizando MQL, atribuindo esse comportamento à melhoria das condições tribológicas na interface cavaco–ferramenta. De forma semelhante, Su et al. (2017) observou reduções nas forças de corte e na força de avanço ao utilizar ferramentas com microcanais paralelos à aresta principal de corte. Segundo o autor, a redução do comprimento real de contato e a dificuldade de adesão do cavaco sobre a superfície da ferramenta foram fatores determinantes para a melhoria observada na usinagem do Ti6Al4V.

Outros estudos também destacam o papel da lubrificação associada às texturas para usinar Ti6Al4V. Mishra et al. (2020) verificou que ferramentas texturizadas operando em condições de MQL e nano-MQL apresentaram reduções expressivas nas forças de corte, com diminuições de até 16,8% na força de usinagem e 28,6% na força de avanço. De forma semelhante, Arulkirubakaran et al. (2018) investigaram ferramentas com microcanais associados a uma mistura de MoS_2 e óleo como lubrificante semissólido, observando reduções de até 30% nas forças de corte em comparação com ferramentas não texturizadas.

Com o objetivo de avaliar a influência da presença de MoS_2 sobre as forças de usinagem, foi realizada uma análise estatística ANOVA do tipo *one-way*, considerando o fator “presença/ausência de MoS_2 ”. A escolha desse método foi motivada pela quantidade limitada

de ensaios experimentais disponíveis para cada condição. Os valores de p obtidos podem ser observados na Figura 47, a qual apresenta os gráficos do tipo *LS Means* (*Least Squares Means*), representação gráfica normalmente empregada em análises ANOVA *one-way*, diferentemente dos gráficos tradicionais de efeitos utilizados em planejamentos fatoriais mais complexos. Para a força na condição de acabamento, obteve-se $p = 0,16$, indicando ausência de significância estatística ao nível de 5% ($p > 0,05$), embora os resultados sugiram uma possível tendência de influência do MoS₂ sobre o comportamento da força nessa condição. Já para a força na condição de desbaste, foi obtido $p = 0,02$, evidenciando diferença estatisticamente significativa entre as condições com e sem MoS₂. Esse resultado indica que a presença do lubrificante sólido exerceu influência relevante sobre as forças de usinagem durante o desbaste. A ausência de significância na condição de acabamento pode estar associada à elevada dispersão experimental e ao número reduzido de réplicas, fatores que reduzem o poder estatístico da análise.

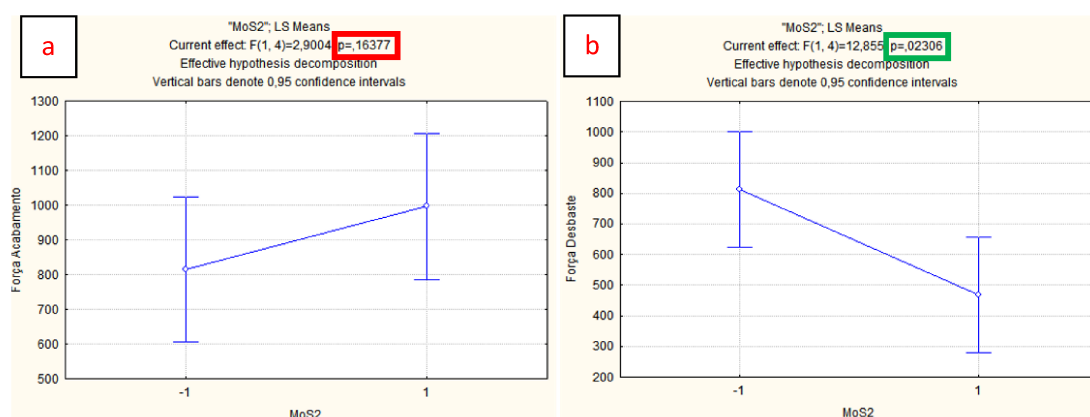


Figura 47 – Gráficos *LS Means* obtidos a partir da ANOVA *one-way* para as forças de usinagem em função da presença e ausência de MoS₂. Em (a), resultados para a condição de acabamento ($p = 0,16$), indicando ausência de significância estatística ao nível de 5%. Em (b), resultados para a condição de desbaste ($p = 0,02$), evidenciando efeito estatisticamente significativo da presença de MoS₂ sobre a força de usinagem.

4.3.4 Resultados de Rugosidade da Etapa 3

A rugosidade superficial das peças usinadas foi avaliada com o objetivo de analisar a influência das diferentes configurações de ferramenta na qualidade da superfície obtida após o processo de usinagem. Assim como na análise das forças de corte, foram consideradas duas condições de corte distintas, representando operações de acabamento e desbaste. A comparação entre ferramentas lisas e texturizadas permite avaliar se a presença de microtexturas e de

lubrificante sólido pode contribuir para melhorar as condições tribológicas durante o processo e, consequentemente, influenciar o acabamento superficial das peças usinadas. Os testes de rugosidade foram realizados em paralelo com os testes de força.

Os valores médios de rugosidade superficial, parâmetro Ra, são apresentados na Figura 48, onde são comparadas as três condições de ferramenta avaliadas: ferramenta lisa, ferramenta texturizada sem lubrificante sólido e ferramenta texturizada com aplicação de MoS₂ nas microtexturas.

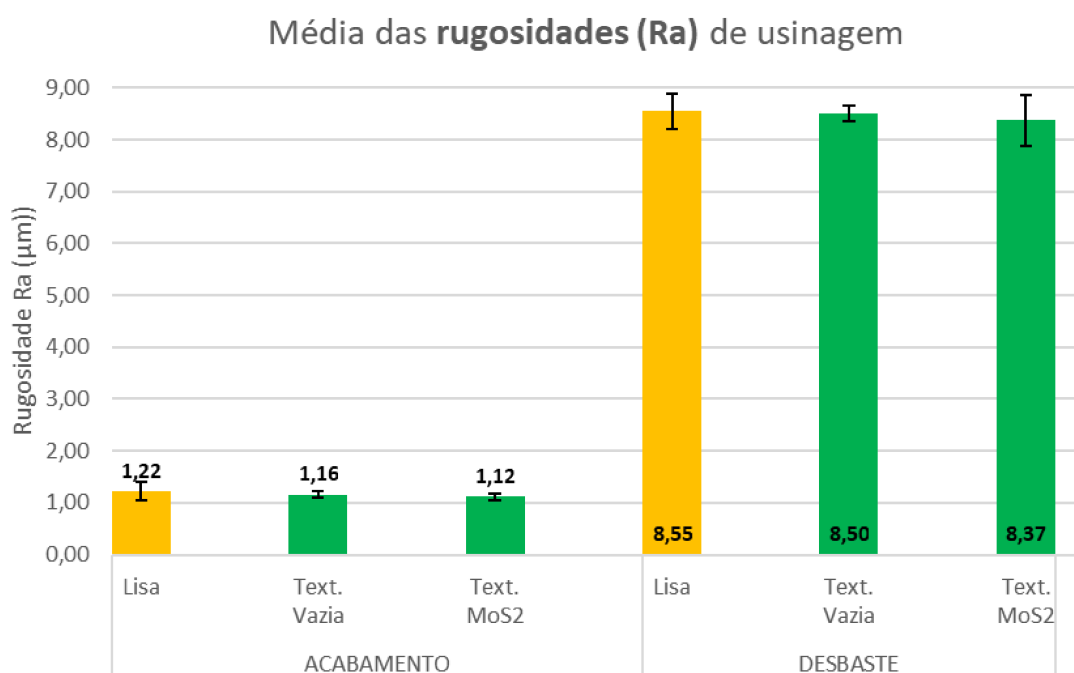


Figura 48 – Média das rugosidades superficiais (Ra) obtidas para ferramentas lisa, texturizada sem lubrificante sólido e texturizada com MoS₂, nas condições de acabamento e desbaste.

Na condição de acabamento, observa-se que as ferramentas texturizadas apresentaram valores de rugosidade superficial ligeiramente inferiores ao obtido com a ferramenta lisa. A ferramenta lisa apresentou valor médio de rugosidade de 1,22 μm, enquanto a ferramenta texturizada sem lubrificante sólido apresentou valor de 1,16 μm (redução de aproximadamente 4,9%). O menor valor foi observado para a ferramenta texturizada com aplicação de MoS₂ nas texturas, com rugosidade média de 1,12 μm (redução de aproximadamente 8,2%). Esses resultados indicam que a presença das microtexturas, especialmente quando associadas à lubrificação sólida, pode contribuir para pequenas melhorias na qualidade superficial das peças usinadas.

Na condição de desbaste, os valores de rugosidade obtidos para as três configurações de ferramenta apresentaram magnitudes bastante próximas entre si. A ferramenta lisa apresentou rugosidade média de $8,55 \mu\text{m}$, enquanto as ferramentas texturizadas sem lubrificante sólido e com MoS_2 apresentaram valores médios de $8,50 \mu\text{m}$ (redução de aproximadamente 0,6%) e $8,37 \mu\text{m}$ (redução de aproximadamente 2,1%), respectivamente. Esse comportamento indica que, em condições de corte mais severas, os parâmetros de usinagem (particularmente o avanço) tendem a exercer influência predominante sobre a rugosidade da superfície gerada, reduzindo a influência das características superficiais da ferramenta sobre esse parâmetro.

Mesmo assim, observa-se uma leve tendência de redução da rugosidade superficial com o uso de ferramentas texturizadas, especialmente quando associadas ao lubrificante sólido. Esse comportamento pode estar relacionado à melhoria das condições de atrito na interface ferramenta–cavaco, favorecendo um escoamento mais estável do cavaco e reduzindo irregularidades na formação da superfície usinada. Uma possível hipótese é que a texturização modificou o escoamento do cavaco e estabilizou a interface ferramenta–cavaco, reduzindo aderência de material na interface, o que favoreceu a geração de uma superfície mais uniforme e, conseqüentemente, menor rugosidade. Entretanto, a textura também pode ter aumentado a deformação plástica e o atrito localizado durante o escoamento do cavaco, elevando a energia necessária para o corte e resultando em maiores forças de usinagem, como observado.

Os resultados obtidos neste trabalho apresentam comportamento semelhante ao observado em diversos estudos da literatura que investigaram a influência da texturização de ferramentas na qualidade superficial durante a usinagem da liga Ti6Al4V. Em geral, esses estudos indicam que a presença de microtexturas pode contribuir para a melhoria da qualidade superficial, principalmente devido à redução do atrito e à modificação das condições de contato entre ferramenta, cavaco e peça.

Resultados semelhantes foram observados por Li et al. (2018), que investigaram ferramentas com microtexturas do tipo *dimple* produzidas por laser na superfície de saída. Os autores verificaram que a presença dessas microtexturas contribuiu para melhorar a qualidade superficial do Ti6Al4V usinado. De forma semelhante, Mishra et al. (2019) observaram que ferramentas texturizadas apresentaram melhor acabamento superficial durante o torneamento da liga Ti6Al4V, atribuindo esse comportamento à melhoria no fluxo de cavacos e à redução da interação direta entre cavaco e superfície da ferramenta.

Outros trabalhos também destacam mecanismos tribológicos semelhantes aos observados neste estudo. Niketh e Samuel (2017) verificaram que a presença de microcavidades em ferramentas utilizadas na furação de Ti6Al4V contribuiu para reduzir o comprimento de

contato e aprisionar partículas de desgaste, melhorando as propriedades tribológicas da interface de contato e contribuindo para a obtenção de superfícies com menor ocorrência de defeitos. Em um estudo posterior, Niketh e Samuel (2018) também observaram que ferramentas texturizadas resultaram em menor formação de defeitos superficiais e redução da formação de rebarbas durante a usinagem do Ti6Al4V.

Com o objetivo de avaliar a influência da presença de MoS₂ sobre a rugosidade superficial, foi realizada uma análise estatística ANOVA do tipo *one-way*, considerando o fator “presença/ausência de MoS₂”. A escolha desse método foi motivada pela quantidade limitada de ensaios experimentais disponíveis para cada condição. Os valores de p obtidos podem ser observados na Figura 49, a qual apresenta os gráficos do tipo LS Means (*Least Squares Means*), representação gráfica normalmente empregada em análises ANOVA *one-way*, diferentemente dos gráficos tradicionais de efeitos utilizados em planejamentos fatoriais mais complexos. Para a rugosidade na condição de acabamento, obteve-se $p = 0,46$, enquanto para a condição de desbaste foi obtido $p = 0,68$. Ambos os resultados indicam ausência de significância estatística ao nível de 5% ($p > 0,05$), sugerindo que, nas condições avaliadas, a presença de MoS₂ não exerceu influência estatisticamente significativa sobre a rugosidade superficial. Além disso, os valores relativamente elevados de p indicam baixa evidência estatística de diferença entre as condições com e sem MoS₂ para ambas as etapas de usinagem. Esse comportamento pode estar relacionado à dispersão experimental dos dados e ao número reduzido de réplicas, fatores que limitam o poder estatístico da análise.

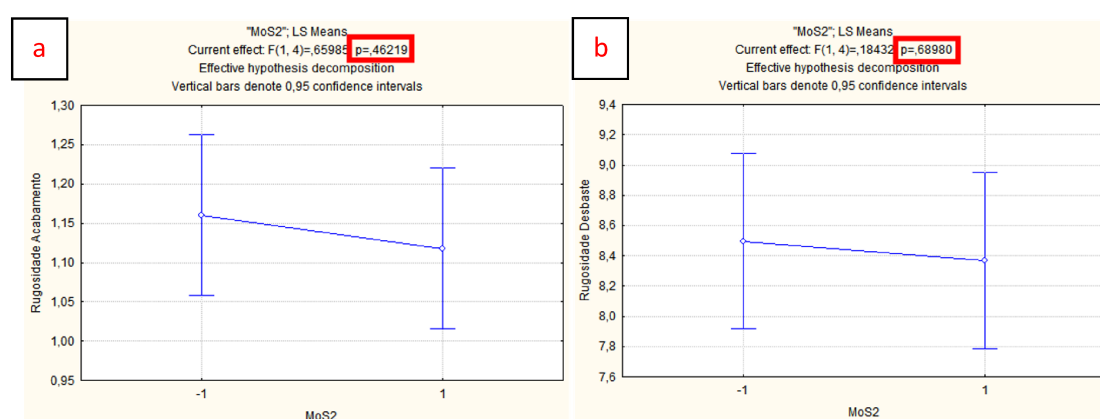


Figura 49 – Gráficos LS Means obtidos a partir da ANOVA *one-way* para a rugosidade superficial em função da presença e ausência de MoS₂. Em (a), resultados para a condição de acabamento ($p = 0,46$) e, em (b), resultados para a condição de desbaste ($p = 0,68$), ambos indicando ausência de significância estatística ao nível de 5%.

4.3.5 Resultados de Vida da Etapa 3

A vida das ferramentas foi avaliada a partir da evolução do desgaste de flanco ao longo do volume de material usinado. O critério adotado para definição do fim de vida da ferramenta foi o desgaste máximo de flanco ($VB_{Bmáx}$) igual a 0,3 mm, metade do valor estabelecido pela norma ISO 3685 (1993). Essa escolha foi realizada com o objetivo de reduzir o consumo de material e o tempo experimental, considerando o elevado custo e a natureza nobre do material utilizado nos testes. Durante os ensaios, o processo de usinagem foi interrompido periodicamente para a medição do desgaste utilizando um microscópio óptico ferramenteiro, permitindo a construção das curvas de desgaste em função do volume de material removido.

Para garantir a repetibilidade das medições, as ferramentas foram posicionadas sempre na mesma orientação por meio de um suporte específico desenvolvido para esse fim. A medição do desgaste de flanco foi realizada diretamente sobre a aresta de corte, permitindo identificar a progressão do desgaste ao longo dos ensaios e definir o momento em que o critério de fim de vida era atingido. A Figura 50 apresenta dois exemplos da medição do desgaste de flanco realizada nas ferramentas utilizadas neste estudo, destacando a região onde foi determinado o valor máximo de desgaste.

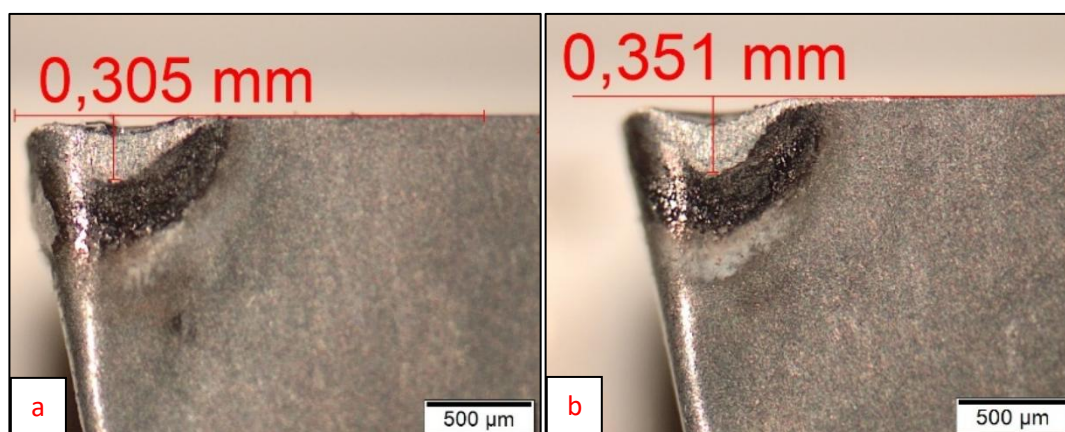


Figura 50 – Exemplo de medição do desgaste de flanco na ferramenta de corte utilizando microscopia óptica. Em (a) tem-se um desgaste próximo de 0,3 mm (305 µm). Em (b), o desgaste ultrapassou consideravelmente 0,3 mm, necessitando uma interpolação como descrito na Subseção 3.6.4.

Quando o desgaste ultrapassou consideravelmente o valor limite estabelecido (como mostrado na Figura 50-b), foi aplicada uma interpolação linear entre os dois pontos mais próximos ao limite para determinar com maior precisão o percurso correspondente ao critério

de fim de vida da ferramenta adotado. Posteriormente, o comprimento usinado foi convertido em volume de material removido (VMR), possibilitando uma comparação mais adequada entre as diferentes condições de ferramenta e de corte avaliadas.

A Figura 51 apresenta uma vista superior da superfície de saída de uma ferramenta texturizada após o ensaio de vida. A dimensão de 0,185 mm corresponde à extensão aparente da região desgastada localizada na faixa não texturizada próxima à aresta de corte. Por se tratar da superfície de saída, essa região está associada ao desenvolvimento de desgaste de cratera e à presença de material aderido, não devendo ser interpretada como desgaste de flanco. O desgaste de flanco utilizado como critério de vida foi avaliado separadamente na superfície de flanco, conforme exemplificado na Figura 50. Observa-se ainda que as microtexturas permaneceram visualmente preservadas, uma vez que o desgaste não avançou significativamente sobre a região texturizada.

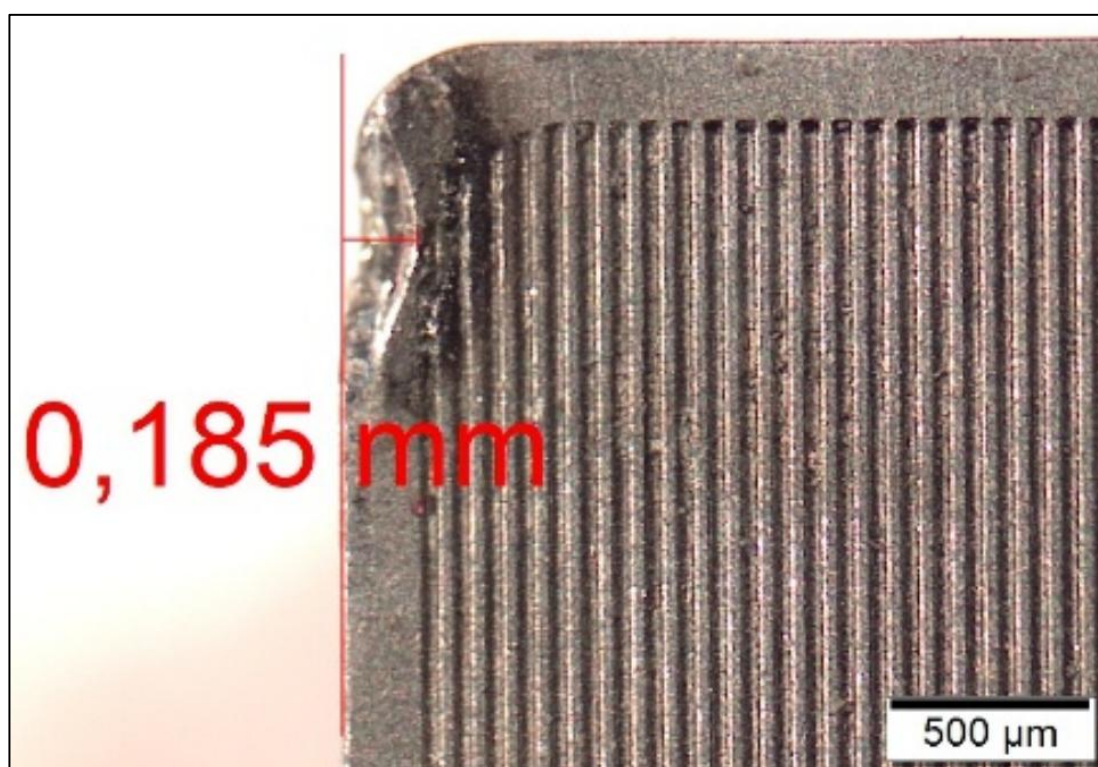


Figura 51 – Desgaste na ferramenta texturizada após ensaio de usinagem, destacando a região lisa próxima à aresta de corte e a região com microtexturas na superfície de saída. Esta ferramenta trabalhou sob condição de acabamento, em que a profundidade de corte foi de 0,5 mm. O valor apresentado não representa o $VB_{Bmáx}$.

É importante ressaltar que esta ferramenta apresentada na Figura 49 foi utilizada na condição de acabamento, com profundidade de corte de 0,5 mm. Nessa condição, a zona de contato entre cavaco e ferramenta tende a se desenvolver mais próxima da aresta de corte, o que explica o fato de o desgaste observado estar concentrado justamente na porção lisa da ferramenta. Assim, a área texturizada permanece relativamente afastada da zona de maior desgaste direto, mantendo suas características geométricas praticamente intactas, evidenciando a boa resistência do material da ferramenta e a boa qualidade do processo de fabricação das texturas. A ausência de deformação ou colapso das ranhuras sugere que o desgaste não evoluiu significativamente para dentro da região texturizada.

As curvas de desgaste obtidas para a condição de acabamento são apresentadas na Figura 52. Nessa figura é possível observar a evolução do desgaste de flanco em função do volume de material usinado para as ferramentas lisa, texturizada sem lubrificante sólido e texturizada com aplicação de MoS₂ nas microtexturas.

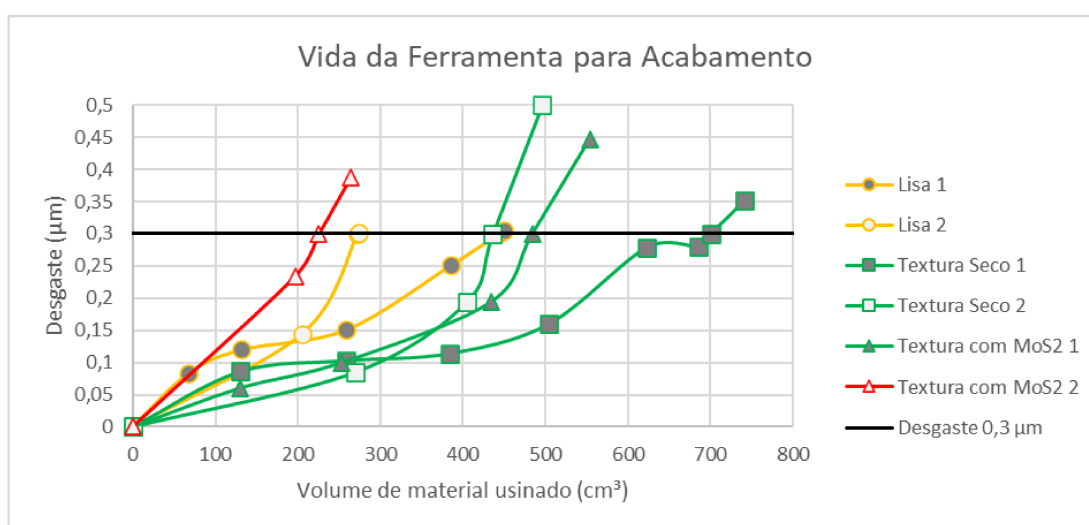


Figura 52 – Evolução do desgaste de flanco em função do volume de material usinado para as ferramentas avaliadas na condição de acabamento.

Na condição de acabamento, observa-se que as ferramentas texturizadas sem lubrificante sólido apresentaram o melhor desempenho geral em termos de vida útil. As duas repetições dessa condição ultrapassaram volumes de material removido superiores aos obtidos com a ferramenta lisa, atingindo valores próximos ou superiores a 700 cm³ antes de alcançar o critério de fim de vida. Esse resultado indica que a presença das microtexturas pode contribuir para reduzir os mecanismos de desgaste atuantes na interface cavaco-ferramenta, aumentando a durabilidade da aresta de corte.

As ferramentas lisas apresentaram vida intermediária, atingindo volumes de material removido inferiores aos obtidos com as ferramentas texturizadas sem lubrificante sólido. Ainda assim, seu desempenho foi superior ao observado em uma das repetições da ferramenta texturizada com MoS₂.

Já as ferramentas texturizadas com aplicação de MoS₂ apresentaram maior dispersão nos resultados. Enquanto uma das repetições apresentou comportamento semelhante ao das ferramentas texturizadas sem lubrificante, a outra atingiu o critério de fim de vida com volume significativamente menor de material removido. Esse comportamento pode estar associado à distribuição não uniforme do lubrificante sólido nas microcavidades ou à sua rápida remoção durante o processo de usinagem.

Além disso, observa-se que, de maneira geral, os segundos testes de cada condição apresentaram vida útil inferior em relação ao primeiro ensaio correspondente. Esse comportamento pode estar relacionado à redução gradual do diâmetro da barra ao longo dos experimentos. Após a primeira rodada de ensaios, a diminuição do diâmetro da peça pode ter aumentado a suscetibilidade a vibrações durante a usinagem, o que tende a acelerar os mecanismos de desgaste da ferramenta e reduzir sua vida útil.

Por fim, os melhores resultados, condição com texturização sem MoS₂, foram capazes de usinar em média 58% mais do volume de material que ferramentas lisas.

As curvas de desgaste para a condição de desbaste são apresentadas na Figura 53. Na condição de desbaste, as ferramentas texturizadas sem lubrificante sólido novamente apresentaram melhor desempenho, atingindo volumes de material removido superiores ou próximos aos obtidos com as ferramentas lisas antes de atingir o critério de fim de vida.

As ferramentas lisas apresentaram comportamento intermediário, com uma das repetições atingindo o limite de desgaste com volume de material removido relativamente elevado, enquanto a outra apresentou vida útil inferior.

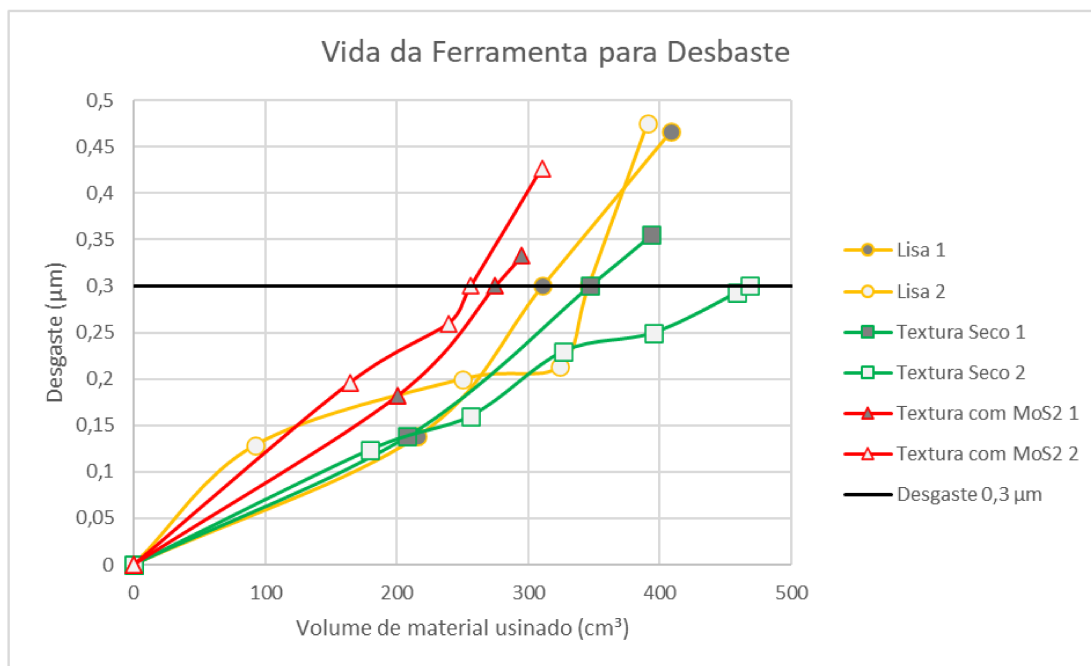


Figura 53 – Evolução do desgaste de flanco em função do volume de material usinado para as ferramentas avaliadas na condição de desbaste.

Por outro lado, as ferramentas texturizadas com MoS_2 apresentaram as menores vidas úteis na condição de desbaste. Em ambas as repetições, o critério de fim de vida foi atingido com volumes de material removido inferiores aos observados para as demais condições de ferramenta. Uma possível explicação para o pior desempenho das ferramentas contendo MoS_2 está relacionada ao comportamento do cavaco e ao modo como o lubrificante sólido é liberado a partir das microtexturas durante a usinagem. Em materiais altamente dúcteis, como o alumínio, o cavaco tende a se deformar plasticamente de maneira mais homogênea, podendo penetrar nas microtexturas da ferramenta de forma relativamente uniforme. Nessa condição, a liberação do lubrificante sólido armazenado nas texturas também ocorre de maneira mais estável e contínua, contribuindo para a redução do atrito na interface cavaco-ferramenta. Entretanto, no caso da liga Ti6Al4V , o mecanismo de formação de cavaco é caracterizado pela formação de cavacos segmentados e por deformações altamente localizadas. Esse comportamento dificulta uma interação uniforme entre o cavaco e as texturas da ferramenta, resultando em uma liberação irregular do MoS_2 ao longo do processo de corte. Dessa forma, a interface cavaco-ferramenta pode alternar entre momentos de maior lubrificação, quando o MoS_2 é efetivamente liberado, e momentos em que sua atuação é limitada. Essa alternância tende a gerar instabilidades no escoamento do cavaco e oscilações nos esforços de corte. De acordo com Sun et al. (2016), a formação de cavacos segmentados nessa liga está associada à

ocorrência de forças de corte cíclicas e elevadas tensões na interface cavaco-ferramenta, fenômenos que contribuem para a intensificação dos mecanismos de desgaste e para a redução da vida da ferramenta. Assim, é plausível que a liberação irregular do MoS₂ nas condições avaliadas tenha contribuído para aumentar a instabilidade do processo e, conseqüentemente, acelerar o desgaste das ferramentas texturizadas contendo esse lubrificante sólido.

Outra explicação já abordada na literatura, reporta que o aumento excessivo da temperatura pode ocasionar degradação tribológica e oxidação do MoS₂, reduzindo sua eficiência lubrificante e, em alguns casos, elevando o coeficiente de atrito e o desgaste da interface cavaco-ferramenta. Hardell, Efeoglu e Prakash (2010) relataram significativa degradação das características tribológicas de revestimentos contendo MoS₂ após exposição a temperaturas elevadas, atribuindo esse comportamento à formação de óxidos abrasivos de molibdênio decorrentes da oxidação do material lubrificante.

Esse comportamento pode estar relacionado aos resultados obtidos nos ensaios de vida da ferramenta realizados no presente trabalho, nos quais a presença de MoS₂ promoveu pior desempenho de corte. Considerando que os ensaios de vida possuem longa duração e elevada geração de calor na região de corte, especialmente durante a usinagem da liga Ti6Al4V, a interface cavaco-ferramenta pode ter atingido temperaturas suficientemente elevadas para comprometer a estabilidade tribológica do lubrificante sólido. Além disso, ligas de titânio apresentam baixa condutividade térmica, dificultando a dissipação de calor e concentrando temperaturas elevadas na zona de corte. Dessa forma, é possível que o aumento da temperatura durante os ensaios tenha reduzido a eficiência lubrificante do MoS₂, favorecendo mecanismos de adesão, aumento do atrito e intensificação do desgaste da ferramenta.

Os resultados obtidos neste trabalho apresentam similaridades com estudos encontrados na literatura que investigaram o efeito da texturização de ferramentas na usinagem da liga Ti6Al4V. De maneira geral, os trabalhos relatam que a presença de microtexturas na face de ataque pode reduzir os mecanismos de desgaste e aumentar a vida útil da ferramenta, principalmente devido à diminuição da área de contato cavaco-ferramenta e à redução da adesão do material usinado. Resultados semelhantes foram observados por Zhou et al. (2019), que verificaram redução significativa na taxa de desgaste ao utilizar ferramentas texturizadas com *grooves*, atribuída à melhoria das condições tribológicas na interface de corte. De forma semelhante, Su et al. (2018) observaram que ferramentas de PCD com *grooves* apresentaram menor adesão de cavacos durante o torneamento de Ti6Al4V, indicando que as texturas atuam dificultando a formação e crescimento de camadas aderidas sobre a superfície da ferramenta. Mishra et al. (2018) também observaram menor desgaste em ferramentas revestidas e

texturizadas, associando esse comportamento à redução da área de contato e à modificação da superfície da ferramenta promovida pela texturização a laser. Além disso, Liu et al. (2019) destacaram que as microtexturas podem atuar como reservatórios de lubrificação e contribuir para a redução da temperatura de corte, retardando a evolução do desgaste. De maneira semelhante ao observado neste trabalho, Sawant et al. (2018) verificaram que texturas superficiais podem melhorar a dissipação térmica e reduzir os mecanismos de desgaste durante a usinagem da liga Ti6Al4V. Assim, os resultados obtidos neste estudo corroboram a tendência reportada na literatura de que a texturização da face de ataque pode contribuir para melhorar o desempenho tribológico da ferramenta e retardar a progressão do desgaste, resultando em aumento da vida útil durante o processo de usinagem.

Por fim, os melhores resultados, condição com texturização sem MoS₂, foram capazes de usinar em média 24% mais do volume de material que ferramentas lisas.

4.3.6 Resultados de Desgaste dos Testes de Vida da Etapa 3

Após a avaliação da vida das ferramentas e da evolução do desgaste, torna-se importante analisar as características morfológicas e químicas das superfícies desgastadas, visando identificar os mecanismos de desgaste predominantes em cada condição de usinagem. Para isso, foram realizadas análises por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS), permitindo avaliar a presença de material aderido, produtos triboquímicos e alterações na superfície das ferramentas após os ensaios de vida. A combinação dessas técnicas possibilita uma melhor compreensão da influência da texturização e da aplicação de MoS₂ sobre os fenômenos tribológicos que governam o desgaste durante a usinagem da liga Ti6Al4V.

As análises de desgaste apresentadas nesta subseção foram realizadas em uma aresta de corte representativa de cada condição experimental avaliada. Ressalta-se que as ferramentas analisadas não removeram necessariamente o mesmo volume de material, uma vez que o critério de encerramento dos ensaios foi o desgaste máximo de flanco ($VB_{B_{\max}}$) igual a 0,3 mm, correspondente à metade do valor recomendado pela norma ISO 3685 (1993). Além disso, em algumas condições o desgaste ultrapassou ligeiramente esse limite antes da interrupção do ensaio, tornando necessária a aplicação de interpolação para a determinação mais precisa da vida da ferramenta, conforme discutido na Subseção 4.3.5. Consequentemente, pequenas

diferenças na quantidade de material usinado entre as ferramentas devem ser consideradas durante a interpretação comparativa das imagens de desgaste apresentadas.

A Figura 54 apresenta imagens obtidas por microscopia óptica da superfície de saída das ferramentas após os ensaios de usinagem, antes da realização da limpeza química. Observa-se a presença de regiões com diferentes tonalidades e aspectos superficiais, incluindo áreas mais escuras, que podem estar associadas à presença de produtos triboquímicos e óxidos formados durante o processo de corte, e regiões mais brilhantes, possivelmente relacionadas ao material aderido proveniente da peça usinada ou a áreas do substrato da ferramenta expostas. Também são observadas pequenas lascas e irregularidades superficiais, que podem indicar a ocorrência de mecanismos de desgaste mais severos, tais como lascamento localizado e destacamento de material aderido. Entretanto, devido à complexidade das interações tribológicas envolvidas e às limitações da análise exclusivamente por microscopia óptica, tais interpretações devem ser consideradas preliminares. Assim, para uma identificação mais precisa das regiões observadas e dos mecanismos de desgaste atuantes, são apresentadas posteriormente análises complementares por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS).

A remoção do material aderido da superfície das ferramentas demandou a utilização de limpeza química com o reagente Kroll. Esse procedimento é particularmente importante na usinagem da liga Ti6Al4V, uma vez que o titânio apresenta elevada reatividade química e forte tendência à adesão sobre a superfície da ferramenta, formando camadas aderidas que dificultam a identificação das regiões efetivamente desgastadas. Dessa forma, a utilização do reagente permitiu remover parte desses depósitos, possibilitando uma análise mais confiável da morfologia do desgaste.

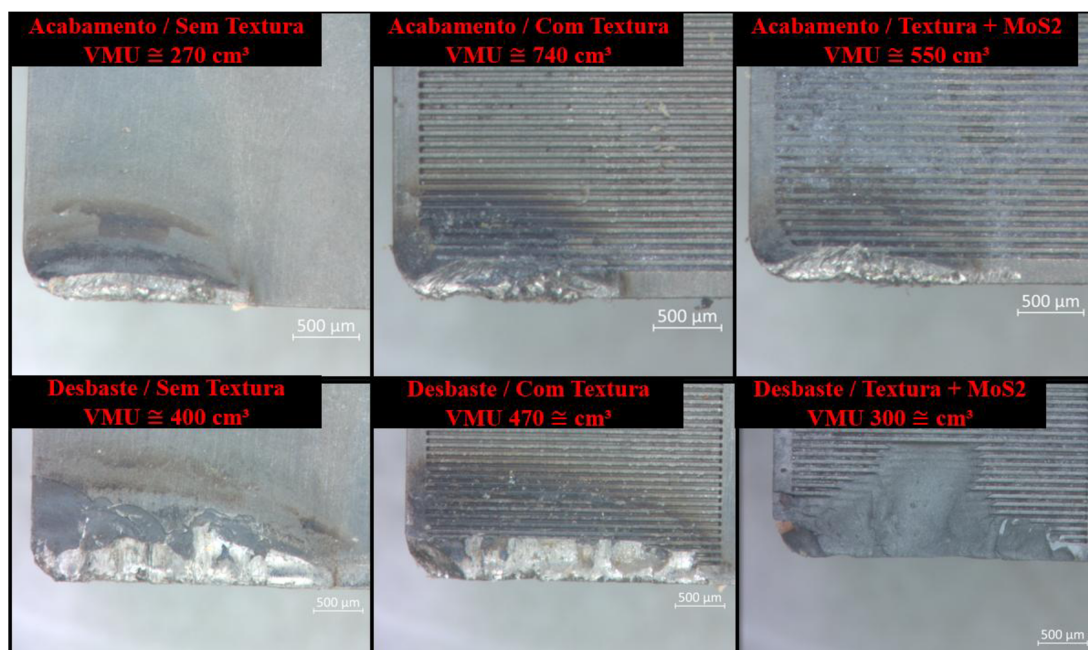


Figura 54 – Imagem obtida por microscopia óptica da superfície de saída da ferramenta de corte após a usinagem da liga Ti6Al4V (Titânio Grau 5), antes da limpeza química, evidenciando a presença de material aderido e produtos de desgaste formados durante o processo de corte.

A Figura 55 apresenta as mesmas superfícies mostradas anteriormente, porém após a realização da limpeza química com reagente de Kroll. Após a remoção do material aderido, tornou-se possível observar com maior nitidez diversos detalhes da superfície desgastada, incluindo a extensão real das regiões de desgaste, a presença de marcas de escorregamento, áreas de destacamento de material, possíveis regiões de lascamento e diferenças na morfologia superficial das ferramentas. Em comparação com as imagens anteriores, nota-se que parte das regiões anteriormente brilhantes foi removida pela ação do reagente, evidenciando que tais áreas eram constituídas por material aderido proveniente da peça usinada e não pelo substrato da ferramenta propriamente dito.

Além disso, a limpeza química permitiu revelar regiões anteriormente encobertas por depósitos aderidos, facilitando a identificação das áreas efetivamente submetidas aos mecanismos de desgaste durante a usinagem da liga Ti6Al4V. Também há uma redução significativa das áreas escurecidas. Essa etapa é particularmente importante devido à elevada afinidade química entre o titânio e os materiais de ferramenta, que favorece a formação de camadas aderidas e dificulta a análise direta da superfície após os ensaios. Dessa forma, as imagens obtidas após a limpeza constituem uma base mais confiável para a interpretação dos mecanismos de desgaste, a qual será complementada pelas análises de composição química por

EDS e pelas observações em maior ampliação obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), apresentadas nas seções subsequentes.



Figura 55 – Imagem obtida por microscopia óptica da superfície de saída da ferramenta de corte após a limpeza química com reagente de Kroll, evidenciando a remoção do material aderido e permitindo a identificação das regiões efetivamente desgastadas da ferramenta.

A Figura 56 apresenta o mapeamento químico por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) da superfície de saída da ferramenta submetida à condição de acabamento. Com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados e evitar uma sobrecarga de informações, foram selecionados apenas os principais elementos químicos de interesse para a presente análise. Para o material usinado, a liga Ti6Al4V, foi escolhido o elemento titânio (Ti), uma vez que os mapas de distribuição do alumínio (Al) e do vanádio (V) apresentaram comportamento praticamente idêntico, não acrescentando informações relevantes à discussão. De forma semelhante, para a ferramenta de metal duro (WC-Co), optou-se pela apresentação do tungstênio (W), pois o cobalto (Co) apresentou distribuição equivalente e o carbono (C) não forneceu informações adicionais de interesse para a interpretação dos mecanismos de desgaste.

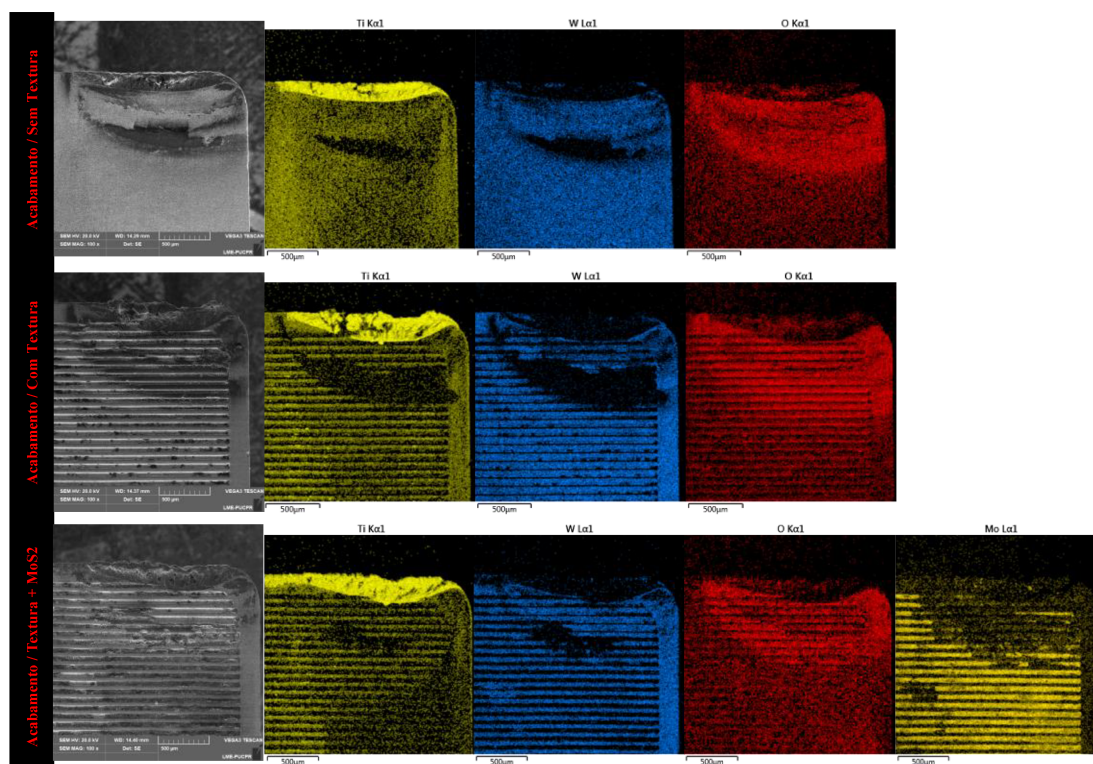


Figura 56 – Mapeamento químico por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) da superfície de saída da ferramenta submetida à condição de acabamento, apresentando a distribuição dos elementos titânio (Ti) em amarelo, tungstênio (W) em azul, oxigênio (O) em vermelho e molibdênio (Mo) em laranja. A presença de titânio indica regiões com material aderido proveniente da peça usinada, enquanto o tungstênio evidencia o substrato da ferramenta de metal duro. O molibdênio está associado aos resíduos do lubrificante contendo MoS_2 e o oxigênio sugere a formação de produtos triboquímicos, possivelmente relacionados à presença de resíduos carbonáceos oriundos da degradação térmica do lubrificante.

Para a avaliação da presença do lubrificante sólido armazenado nas microtexturas, foi selecionado o molibdênio (Mo), uma vez que o silício (Si), proveniente do selante utilizado na fixação do MoS_2 , apresentou o mesmo padrão, e, portanto, é uma informação redundante, enquanto o enxofre (S) exibiu baixa intensidade e distribuição pouco representativa. Além disso, o oxigênio (O) foi incluído na análise devido ao seu comportamento diferenciado e ao potencial de fornecer informações relevantes sobre a ocorrência de reações triboquímicas na interface de corte, especialmente relacionadas à formação de óxidos e outros produtos resultantes da interação entre ferramenta, peça e atmosfera durante a usinagem.

O mapa de titânio evidencia regiões de adesão de material proveniente da peça usinada sobre a superfície de saída da ferramenta, enquanto o tungstênio permite identificar as regiões expostas da ferramenta de metal duro. Por sua vez, a distribuição de molibdênio possibilita

avaliar a permanência de resíduos associados ao lubrificante sólido após os ensaios de usinagem. Já o oxigênio apresenta distribuição mais heterogênea, sugerindo a ocorrência de transformações triboquímicas na interface cavaco-ferramenta. A interpretação detalhada dessas distribuições químicas, em conjunto com as observações morfológicas obtidas por MEV, permite uma compreensão mais abrangente dos mecanismos de desgaste atuantes na condição de acabamento.

Um aspecto particularmente relevante observado no mapeamento químico é a existência de regiões com elevada concentração de oxigênio que não coincidem com áreas de elevada intensidade de titânio ou tungstênio. Esse resultado sugere que tais regiões não correspondem, predominantemente, à formação de óxidos de titânio ou de tungstênio sobre a superfície da ferramenta. Dessa forma, uma hipótese mais plausível é que o oxigênio detectado esteja associado à formação de produtos triboquímicos decorrentes da interação entre o fluido de corte e a superfície submetida às elevadas temperaturas geradas durante a usinagem da liga Ti6Al4V. Nessas condições, podem ocorrer reações de degradação térmica do fluido e a formação de depósitos ricos em oxigênio, os quais permanecem aderidos à superfície da ferramenta após o processo de corte. Entretanto, devido à complexidade das reações tribológicas envolvidas, a identificação precisa da natureza desses produtos exige cautela, sendo as análises morfológicas por MEV e a discussão conjunta dos resultados fundamentais para uma interpretação mais consistente dos mecanismos atuantes.

Esses resultados evidenciam a preservação das microtexturas na superfície de saída da ferramenta após usinagem, e estão de acordo com trabalhos como o de Mishra et al. (2019), que observaram que ferramentas contendo texturas superficiais produzidas por laser mantiveram sua integridade estrutural durante a usinagem da liga Ti6Al4V, além de contribuírem para a modificação do contato cavaco-ferramenta.

A Figura 57 apresenta o mapeamento químico por EDS da superfície de saída das ferramentas submetidas à condição de desbaste. Em comparação com a condição de acabamento, observa-se que as alterações químicas na superfície da ferramenta são mais intensas, evidenciando a maior severidade das condições tribológicas impostas durante o processo de corte. As regiões contendo titânio apresentam maior extensão e intensidade, indicando uma adesão mais pronunciada de material proveniente da peça usinada. De maneira semelhante, o sinal de oxigênio torna-se significativamente mais evidente, sugerindo uma intensificação das reações triboquímicas na interface cavaco-ferramenta, possivelmente em decorrência das temperaturas mais elevadas e do maior carregamento mecânico característicos da condição de desbaste.

As regiões correspondentes ao tungstênio apresentam uma distribuição mais heterogênea, indicando uma maior modificação da superfície da ferramenta em comparação à condição de acabamento. Além disso, as áreas com presença de oxigênio, assim como observado anteriormente, não coincidem integralmente com as regiões de maior concentração de titânio ou tungstênio, sugerindo que o oxigênio detectado não está associado exclusivamente à formação de óxidos desses elementos. Dessa forma, é plausível que parte desse sinal esteja relacionada à formação de produtos triboquímicos provenientes da interação entre o fluido de corte e a superfície da ferramenta submetida a elevadas temperaturas. Esses resultados indicam que os fenômenos de adesão e as reações triboquímicas ocorreram de maneira mais intensa durante o desbaste, comportamento compatível com as condições mais severas de usinagem e com a maior geração de calor na zona de corte.

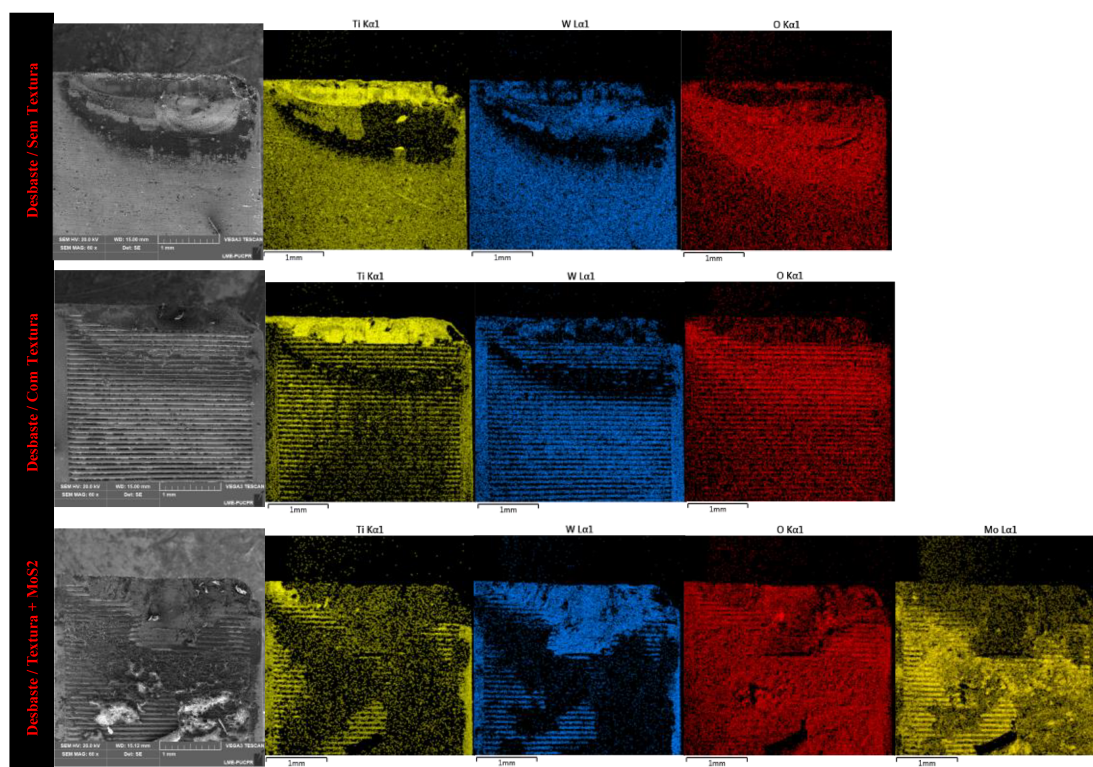


Figura 57 – Mapeamento químico por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) da superfície de saída da ferramenta submetida à condição de desbaste, apresentando a distribuição dos elementos titânio (Ti) em amarelo, tungstênio (W) em azul, oxigênio (O) em vermelho e molibdênio (Mo) em laranja. A análise permite identificar as regiões de adesão de material da peça, as áreas correspondentes ao substrato da ferramenta e a presença de resíduos provenientes do lubrificante e de produtos triboquímicos formados durante a usinagem.

A Figura 58 apresenta o mapeamento químico por EDS da superfície de flanco da ferramenta submetida à condição de acabamento. Observa-se uma quantidade mais significativa de material aderido em comparação à superfície de saída, evidenciada pelas regiões com maior concentração de titânio. O padrão observado para o oxigênio também se mantém nesta região, apresentando áreas de elevada intensidade que não coincidem totalmente com as distribuições de titânio e tungstênio, sugerindo novamente a formação de produtos triboquímicos na interface de corte. Os resultados indicam que os mecanismos de adesão e as reações químicas na superfície também desempenham um papel importante na evolução do desgaste de flanco.

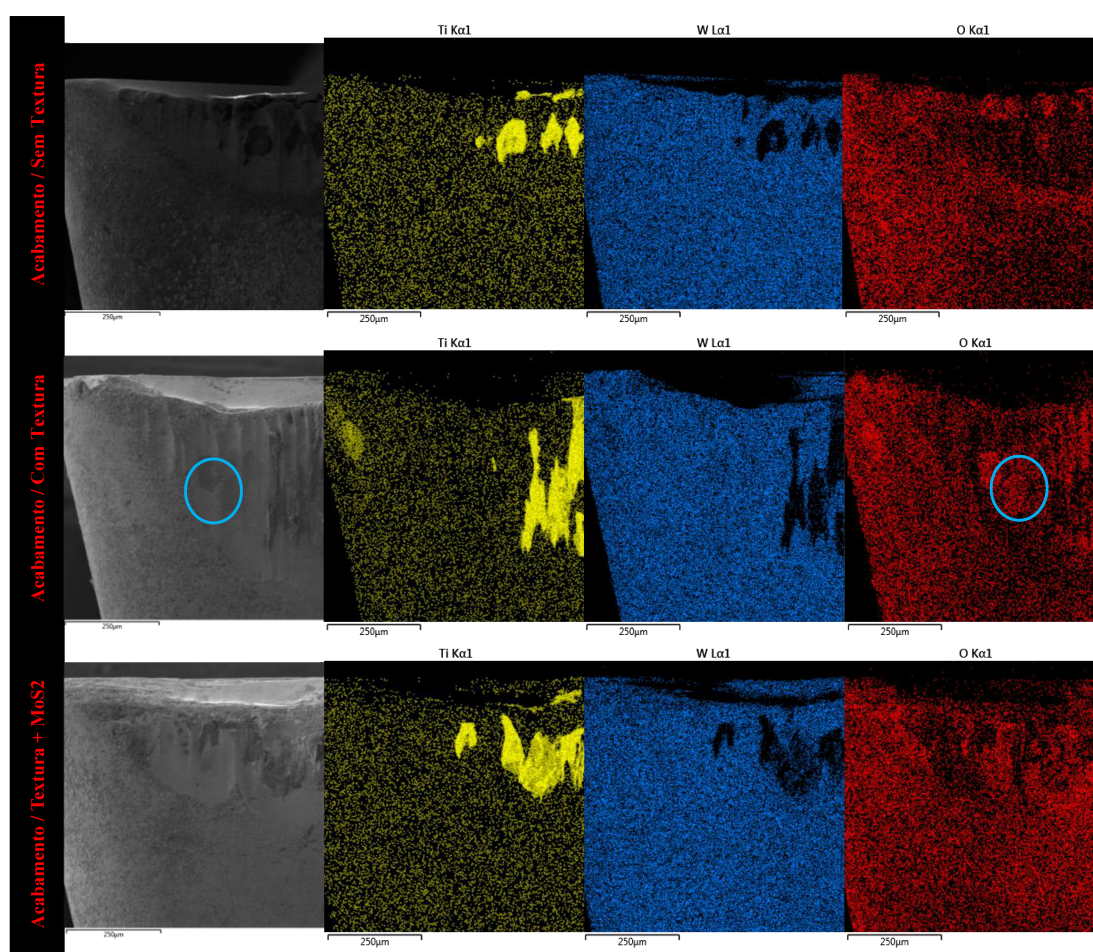


Figura 58 – Mapeamento químico por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) da superfície de flanco da ferramenta submetida à condição de acabamento, apresentando a distribuição dos elementos titânio (Ti) em amarelo, tungstênio (W) em azul e oxigênio (O) em vermelho. O titânio evidencia a adesão de material proveniente da peça usinada, enquanto o tungstênio identifica as regiões expostas do substrato da ferramenta. A presença de oxigênio sugere a formação de produtos triboquímicos na região desgastada. O círculo azul mostra que a região escurecida só aparece no gráfico do oxigênio.

A Figura 59 apresenta o mapeamento químico por EDS da superfície de flanco das ferramentas submetidas à condição de desbaste. Em comparação com a condição de acabamento, observa-se uma intensificação das alterações químicas na superfície, resultado das condições mais severas de corte e da maior geração de calor durante o processo. Destaca-se ainda que, para a condição de ferramenta texturizada com lubrificante sólido, não foi observada a presença significativa de material aderido na superfície de flanco. Por esse motivo, o mapa correspondente ao titânio não foi apresentado para essa condição, uma vez que o sinal obtido foi desprezível e não forneceu informações relevantes para a análise. Esse resultado sugere que, nessa condição específica, os mecanismos de adesão foram menos pronunciados, embora isso não tenha se traduzido em maior vida da ferramenta, conforme discutido anteriormente.

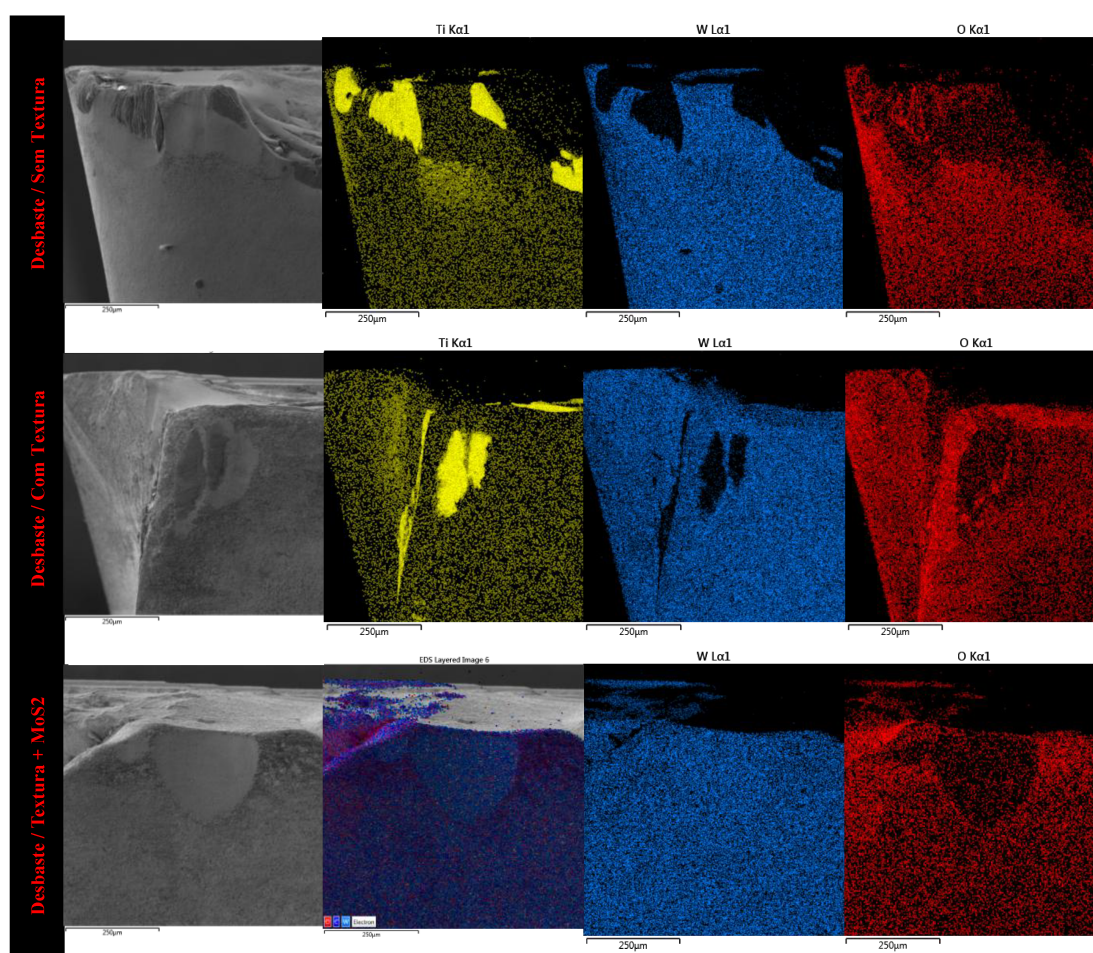


Figura 59 – Mapeamento químico por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) da superfície de flanco da ferramenta submetida à condição de desbaste, apresentando a distribuição dos elementos titânio (Ti) em amarelo, tungstênio (W) em azul e oxigênio (O) em vermelho, permitindo a identificação das regiões de material aderido, do substrato da ferramenta e dos produtos triboquímicos formados durante o processo de usinagem.

A Figura 60 apresenta a micrografia da superfície desgastada da ferramenta utilizada na condição de acabamento sem textura superficial. Observa-se que grande parte da região desgastada apresenta uma morfologia relativamente áspera, com a presença de sulcos e marcas de abrasão, constituindo um indício da atuação do mecanismo de adesão, porém de baixa intensidade aparente. Esse comportamento é compatível com a usinagem da liga Ti6Al4V, na qual as elevadas temperaturas desenvolvidas na interface de corte favorecem esse mecanismo.

O mapeamento químico por EDS revelou elevada concentração de titânio nessas regiões, confirmando que o material aderido é proveniente da peça usinada. Dessa forma, os resultados sugerem que o desgaste da ferramenta na condição de acabamento sem textura superficial ocorreu pela atuação de mecanismo de adesão.

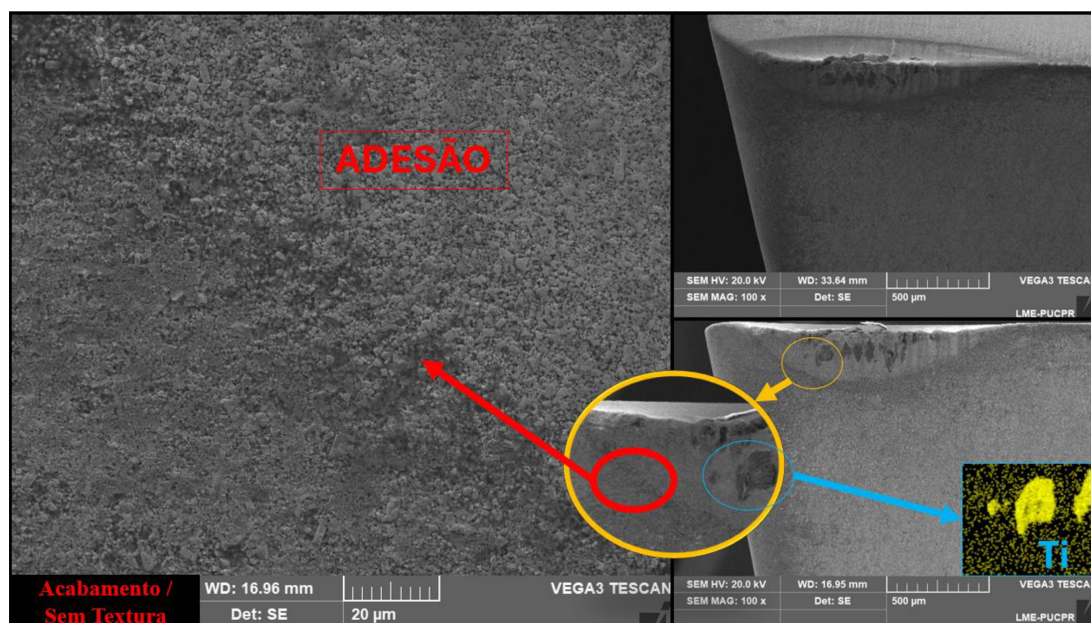


Figura 60 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície desgastada da ferramenta de corte utilizada na condição de acabamento sem textura superficial.

A Figura 61 apresenta a micrografia da superfície desgastada da ferramenta utilizada na condição de acabamento com textura superficial. Assim como observado para a ferramenta lisa, a superfície desgastada apresenta uma morfologia rugosa, indicando a forte atuação do mecanismo de adesão. Entretanto, observa-se uma menor quantidade de material aderido e uma distribuição mais localizada dessas regiões, sugerindo que a presença das microtexturas pode ter contribuído para reduzir a intensidade dos fenômenos de adesão na interface cavaco-

ferramenta. O mapeamento de titânio confirma que as regiões destacadas correspondem ao material proveniente da peça usinada. Dessa forma, os resultados indicam que o mecanismo de adesão também atuou nesta condição, porém com indícios de uma menor severidade do processo adesivo em comparação à ferramenta sem textura superficial.

Resultados comparáveis também foram reportados por Liu et al. (2019), os quais observaram que microtexturas do tipo ranhura na superfície de saída da ferramenta podem reduzir desgaste por adesão, alterando as condições de contato entre cavaco e ferramenta durante a usinagem da liga Ti6Al4V.

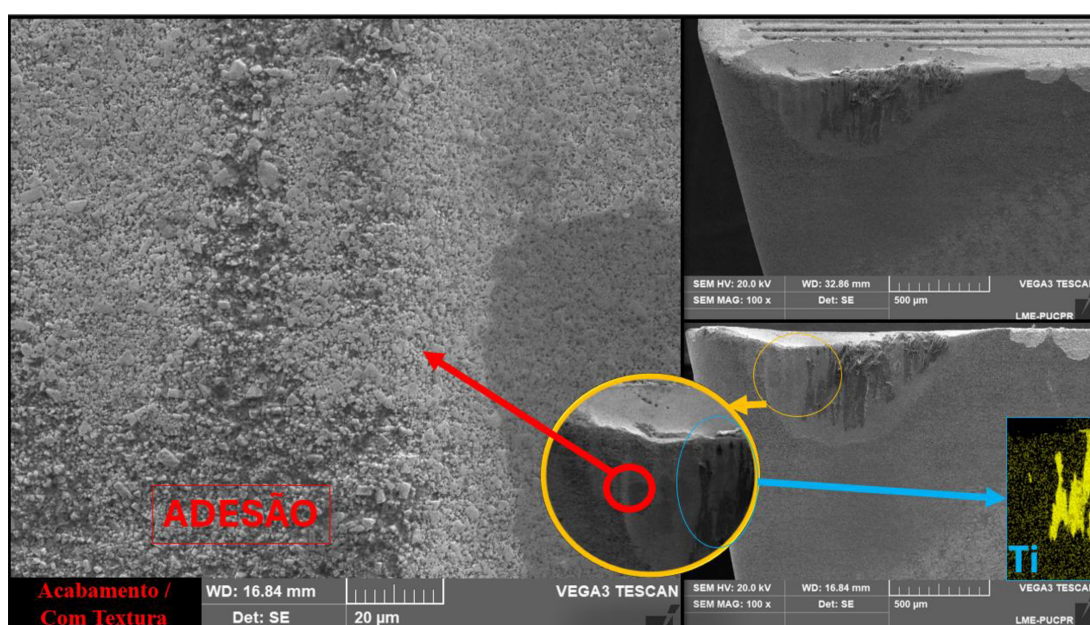


Figura 61 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície desgastada da ferramenta de corte utilizada na condição de acabamento com textura superficial.

A Figura 62 apresenta a micrografia da superfície desgastada da ferramenta utilizada na condição de acabamento com textura superficial e lubrificação contendo MoS_2 . Observa-se novamente uma superfície relativamente rugosa, característica compatível com a atuação do mecanismo de adesão, acompanhada pela presença de regiões contendo material aderido proveniente da peça usinada, confirmadas pelo mapeamento de titânio. Em comparação com a ferramenta texturizada sem lubrificante sólido, nota-se uma área mais extensa de material aderido, sugerindo que a presença do MoS_2 não foi suficiente para impedir a ocorrência dos fenômenos de adesão durante os ensaios de longa duração. Esse comportamento está de acordo com os resultados de vida da ferramenta, nos quais a condição contendo MoS_2 apresentou maior

dispersão e desempenho inferior ao observado para a ferramenta apenas texturizada, indicando uma possível perda de eficiência lubrificante ao longo do processo de usinagem.

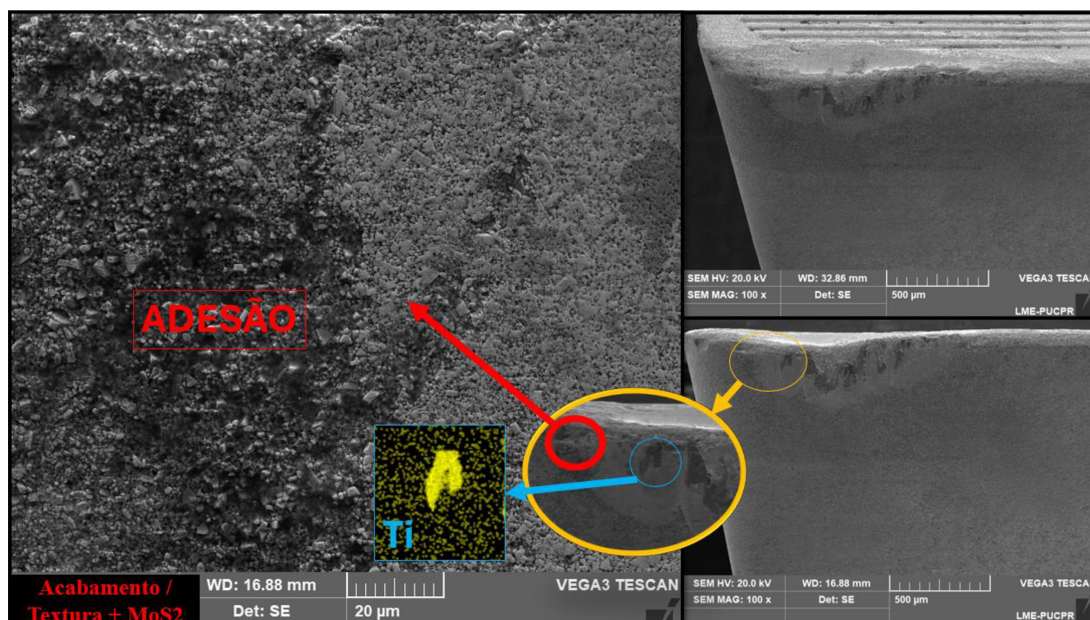


Figura 62 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície desgastada da ferramenta de corte utilizada na condição de acabamento com textura superficial e lubrificação contendo MoS₂.

A Figura 63 apresenta a micrografia da superfície desgastada da ferramenta utilizada na condição de desbaste sem textura superficial. Em comparação com as condições de acabamento, observa-se uma superfície mais irregular e com alterações morfológicas mais intensas, evidenciando a maior severidade das condições de corte. São observadas áreas contendo material aderido e regiões de destacamento desse material, sugerindo a ocorrência cíclica de adesão e remoção de camadas aderidas sobre a superfície da ferramenta. A presença dessas regiões indica que, sob as condições de desbaste, os mecanismos de adesão tornaram-se mais pronunciados. Também há presença de trincas, o que sugere que a ferramenta foi submetida a elevadas tensões térmicas e mecânicas durante a usinagem, favorecendo mecanismos de falha de natureza predominantemente mecânica.

Além disso, as ampliações da aresta de corte evidenciam a ocorrência de lascamentos, caracterizados pela remoção de pequenos fragmentos do material da ferramenta. A presença desses lascamentos sugere a atuação de elevadas tensões mecânicas e térmicas na região de corte, possivelmente intensificadas pela natureza segmentada do cavaco formado na usinagem da liga Ti6Al4V. Dessa forma, os resultados indicam que, na condição de desbaste sem textura

superficial, o desgaste ocorreu pela atuação combinada de mecanismos de adesão e lascamento da aresta de corte, contribuindo para a aceleração da deterioração da ferramenta.

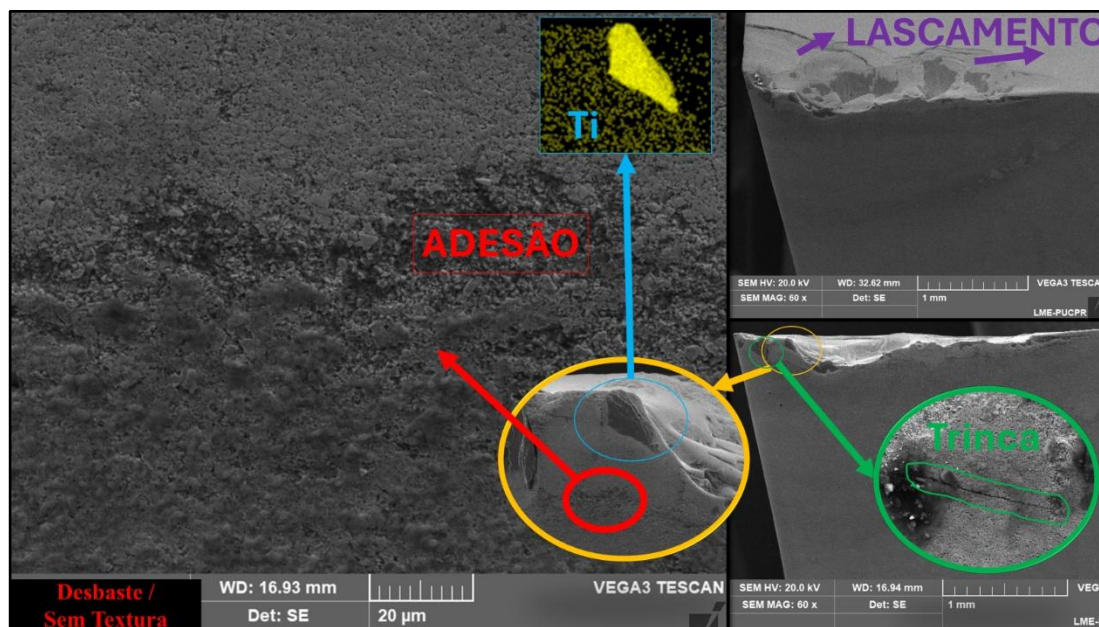


Figura 63 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície desgastada da ferramenta de corte utilizada na condição de desbaste sem textura superficial.

A Figura 64 apresenta a micrografia da superfície desgastada da ferramenta utilizada na condição de desbaste com textura superficial. De maneira semelhante ao observado para a ferramenta sem textura, a superfície apresenta uma morfologia mais irregular e alterações mais intensas em comparação às condições de acabamento, evidenciando a maior severidade das condições de corte. São observadas regiões relativamente rugosas, indicativas da atuação do mecanismo de adesão, além da presença de material aderido e de áreas de destacamento desse material, sugerindo a ocorrência cíclica de adesão e remoção de camadas aderidas sobre a superfície da ferramenta.

Adicionalmente, observa-se uma região localizada de quebra na ponta da ferramenta, indicando a ocorrência de uma falha mais severa da aresta de corte. Essa quebra pode estar associada às elevadas tensões mecânicas e térmicas desenvolvidas durante o desbaste da liga Ti6Al4V, bem como às cargas cíclicas impostas pela formação de cavacos segmentados. Dessa forma, os resultados sugerem que o desgaste nesta condição ocorreu pela atuação combinada de adesão e falha localizada da aresta de corte, contribuindo para a degradação da ferramenta durante o processo de usinagem.

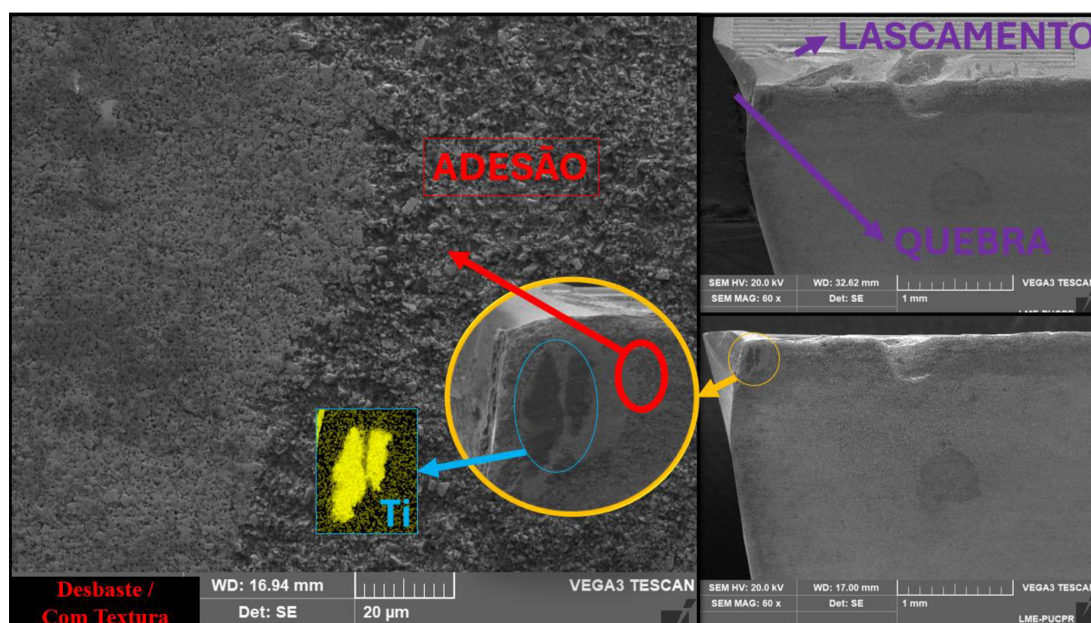


Figura 64 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície desgastada da ferramenta de corte utilizada na condição de desbaste com textura superficial.

A Figura 65 apresenta a micrografia da superfície desgastada da ferramenta utilizada na condição de desbaste com textura superficial e lubrificação contendo MoS_2 . Diferentemente das demais condições avaliadas, não se observa a presença de material aderido sobre a superfície da ferramenta, resultado que está em concordância com as análises de EDS, nas quais não foi identificado sinal significativo de titânio na região analisada. Apesar da ausência de material aderido, a superfície apresenta desgaste por adesão no flanco e um elevado grau de degradação, evidenciado pela formação de uma cratera, além da ocorrência de quebra da aresta de corte e presença de trincas.

A presença de trincas e da quebra da aresta sugere que a ferramenta foi submetida a elevadas tensões térmicas e mecânicas durante a usinagem, favorecendo mecanismos de falha de natureza predominantemente mecânica. Por sua vez, a formação da cratera indica a ocorrência de intenso desgaste na interface cavaco-ferramenta, possivelmente associado às elevadas temperaturas desenvolvidas durante o desbaste da liga Ti6Al4V . Esses resultados sugerem que, embora a presença de MoS_2 possa ter reduzido a tendência à adesão, ela não foi suficiente para evitar a degradação severa da ferramenta, a qual apresentou mecanismos de desgaste mais críticos e compatíveis com a menor vida útil observada para essa condição.

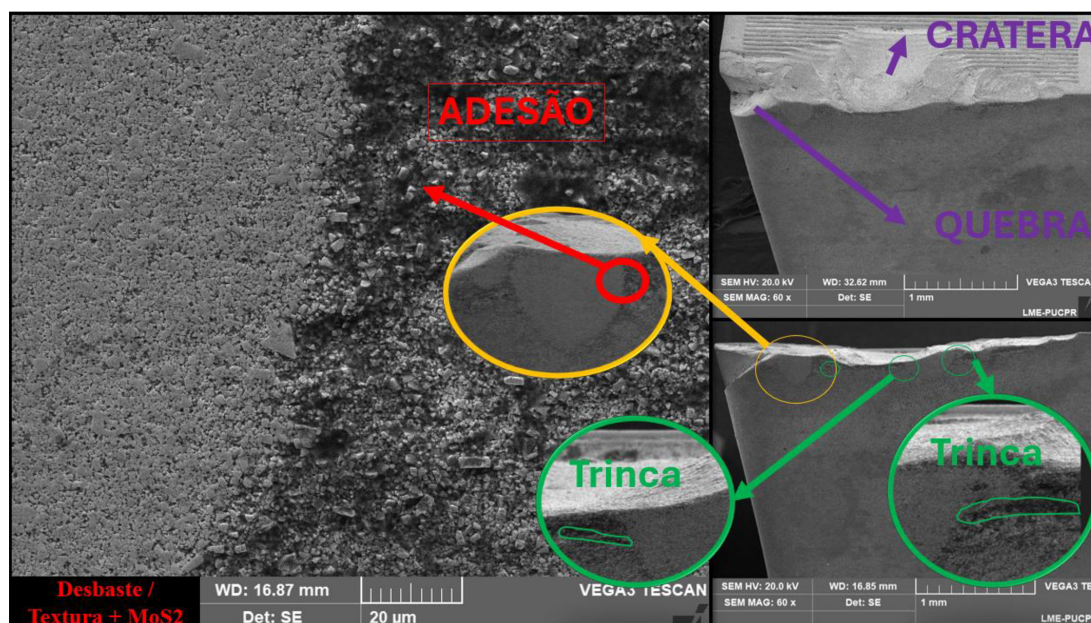


Figura 65 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície desgastada da ferramenta de corte utilizada na condição de desbaste com textura superficial e lubrificação contendo MoS₂.

Os resultados dos desgastes obtidos indicam que a texturização superficial, de maneira isolada, foi capaz de modificar as condições tribológicas na interface cavaco-ferramenta, reduzindo a intensidade dos fenômenos de adesão e proporcionando melhora no desempenho da ferramenta, especialmente na condição de acabamento. Em contrapartida, a adição de lubrificante sólido (MoS₂) não resultou em ganhos adicionais de vida da ferramenta. Embora tenha sido observada uma redução significativa da adesão, particularmente na condição de desbaste, esse efeito não se traduziu em menor desgaste, sendo verificada a ocorrência de mecanismos mais severos, como desgaste de cratera, trincas e quebra da aresta de corte.

Esses resultados evidenciam que a simples redução do material aderido não é suficiente para garantir maior vida da ferramenta durante a usinagem da liga Ti6Al4V. Os mecanismos de desgaste observados sugerem que, nas condições avaliadas, o MoS₂ pode ter alterado a natureza das interações tribológicas na interface de corte, reduzindo a adesão, porém sem impedir a atuação de mecanismos de degradação associados às elevadas temperaturas e tensões mecânicas desenvolvidas durante a usinagem. Dessa forma, conclui-se que os efeitos da texturização e da lubrificação sólida são fortemente dependentes do regime de corte e dos mecanismos de desgaste predominantes em cada condição operacional.

Embora a adesão de material sobre a ferramenta seja frequentemente associada ao aumento do desgaste, em determinadas condições essa camada aderida pode atuar como uma

camada protetora temporária (também chamada de *sacrificial layer*). Nesse caso, o material aderido passa a suportar parte das solicitações térmicas e mecânicas impostas pela usinagem, reduzindo o contato direto entre o cavaco e a superfície da ferramenta. A ausência dessa camada, como observado na condição com MoS₂ durante o desbaste, pode ter aumentado a exposição da ferramenta às elevadas temperaturas e tensões na interface de corte, favorecendo mecanismos de desgaste mais severos, como a formação de crateras, trincas e a quebra da aresta de corte.

4.3.7 Resultados de Microdureza e Metalografia da Etapa 3

Com o objetivo de complementar a análise dos mecanismos envolvidos na usinagem da liga Ti6Al4V, foram realizadas análises metalográficas da microestrutura do material, observações em microscopia eletrônica de varredura (MEV) das ferramentas após os ensaios e medições de dureza dos cavacos gerados durante as operações de torneamento.

Assim sendo, foi realizada a caracterização metalográfica da barra de Ti6Al4V utilizada nos experimentos. A amostra foi submetida a ataque químico com ácido fluorídrico (HF), permitindo a revelação da microestrutura da liga. A metalografia obtida em microscópio eletrônico de varredura (MEV) é apresentada na Figura 66, na qual é possível observar a microestrutura característica do Ti6Al4V, composta por grãos equiaxiais associados às fases α e β , com contornos bem definidos. Essa microestrutura é típica de ligas de titânio processadas termomecanicamente e está diretamente relacionada às propriedades mecânicas do material, incluindo sua elevada resistência mecânica e baixa condutividade térmica, fatores que contribuem para sua reconhecida dificuldade de usinagem.

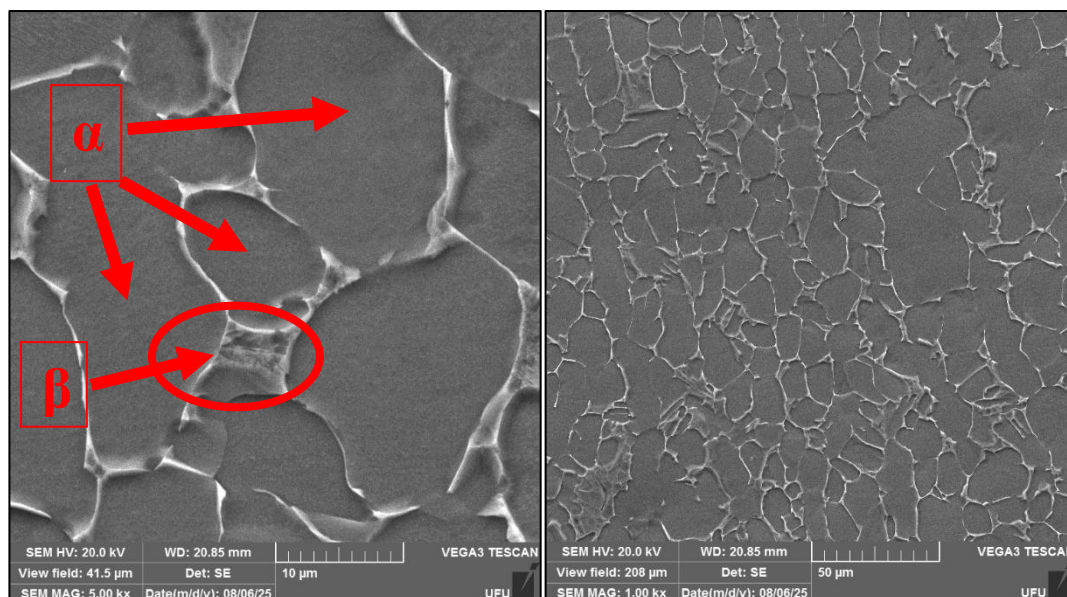


Figura 66 – Microestrutura da liga Ti6Al4V após ataque químico com HF, observada em microscópio eletrônico de varredura, destacando as fases α e β .

A metalografia vista na Figura 66 obtida após o ataque químico com HF revela a microestrutura característica da liga Ti6Al4V, evidenciando grãos equiaxiais bem definidos delimitados por contornos de grão claramente atacados pelo reagente. Observa-se uma morfologia típica de microestrutura bifásica composta predominantemente pela fase α , distribuída em grãos relativamente homogêneos, enquanto regiões associadas à fase β tendem a se concentrar nos contornos de grão ou em regiões intergranulares. O ataque químico evidencia essas interfaces devido à maior energia e reatividade dos contornos de grão, permitindo a visualização da morfologia granular do material. A escala da micrografia indica que os grãos apresentam dimensões da ordem de dezenas de micrômetros, valor compatível com microestruturas de ligas Ti6Al4V processadas termomecanicamente. Essa configuração microestrutural está diretamente relacionada às propriedades mecânicas da liga, como elevada resistência mecânica e comportamento de deformação localizado, com baixa condutividade térmica, características que contribuem para a formação de cavacos segmentados e para a reconhecida dificuldade de usinagem desse material.

Também foram realizadas medições de microdureza da peça (após torneamento) e dos cavacos gerados durante as operações de acabamento e desbaste, com o objetivo de avaliar possíveis alterações nas propriedades mecânicas do material decorrentes das condições de corte. As indentações nos cavacos foram realizadas nas seções longitudinais (ver Figura 67). Os resultados médios das microdurezas dos cavacos obtidos são apresentados no Quadro 11.

Dureza dos Cavacos		
Tipo		Média [HV]
ACABAMENTO	Lisa	329
	Text. Seco	321
	Text. MoS ₂	334
DESBASTE	Lisa	360
	Text. Seco	341
	Text. MoS ₂	326
Dureza da Barra de Ti6Al4V		350

Quadro 11 – Microdureza média dos cavacos obtidos nas diferentes condições de usinagem.

Para ambas as condições de corte, observou-se que as ferramentas texturizadas, especialmente aquelas com lubrificação sólida (MoS₂), tendem a produzir cavacos menos duros, o que pode ser atribuído à redução do atrito na interface cavaco-ferramenta e, consequentemente, à menor intensidade de encruamento. No entanto, no acabamento, a ferramenta com MoS₂ apresentou ligeiro aumento na microdureza dos cavacos em relação à ferramenta lisa, possivelmente devido à alteração do escoamento do cavaco. Esses resultados indicam que os efeitos da texturização superficial, com ou sem lubrificante sólido, são dependentes do regime de corte e influenciam diretamente o comportamento termomecânico da formação do cavaco. A ferramenta lisa, sob condições de desbaste, gerou cavacos com microdureza superior à da matriz (360 HV contra 350 HV), o que evidencia um encruamento adicional induzido pela usinagem. Esse aumento pode ser atribuído à intensa deformação plástica concentrada na zona de cisalhamento primária, amplificada pela ausência de texturização na ferramenta, que aumenta o atrito na interface cavaco-ferramenta. Além disso, o volume de material removido no desbaste e a maior carga mecânica contribuem para elevar a taxa de deformação e restringir a dissipação térmica, resultando em um cavaco com maior endurecimento em relação ao material de origem.

Esse comportamento pode ser explicado pelo intenso grau de deformação plástica imposto ao material durante o processo de formação do cavaco. Durante o corte, o material sofre elevadas taxas de deformação concentradas na zona de cisalhamento primária, podendo ocorrer encruamento significativo do material. Como consequência, em determinadas

condições de corte, a microdureza do cavaco pode atingir valores superiores à microdureza do material de base. Esse fenômeno é frequentemente associado à deformação plástica severa e à formação de bandas de cisalhamento adiabático, características da usinagem de ligas de titânio.

Na condição de acabamento, os valores de microdureza dos cavacos permaneceram relativamente próximos entre as diferentes condições de ferramenta, indicando que o processo de formação do cavaco ocorreu sob níveis de deformação plástica comparáveis. Já na operação de desbaste observa-se maior variação entre as condições avaliadas, o que pode estar associado ao maior grau de deformação plástica imposto ao material durante o processo de corte, favorecendo fenômenos como o encruamento do material.

Entretanto, observa-se que nem todas as condições de usinagem resultaram em cavacos com microdureza superior à do material base. Em alguns casos, os valores medidos permaneceram próximos ou ligeiramente inferiores à microdureza da barra de Ti6Al4V. Esse comportamento pode estar relacionado à influência da temperatura gerada durante o processo de corte. Em condições de elevada geração de calor, pode ocorrer um efeito de amolecimento térmico local no material durante a formação do cavaco, reduzindo parcialmente o efeito do encruamento provocado pela deformação plástica. Dessa forma, o equilíbrio entre deformação plástica – encruamento e efeitos térmicos - amolecimento pode resultar em diferentes níveis de endurecimento do cavaco dependendo das condições de corte e da interação cavaco-ferramenta.

A morfologia dos cavacos gerados durante os ensaios foi analisada por meio de microscopia eletrônica de varredura. A Figura 67 apresenta uma micrografia de um cavaco obtido durante o torneamento da liga Ti6Al4V. Observa-se a presença de morfologia típica de cavacos segmentados, caracterizada por regiões periódicas de bandas de cisalhamento intenso ao longo do cavaco. Esse tipo de cavaco é amplamente reportado na literatura para a usinagem de ligas de titânio e está associado à formação de bandas de cisalhamento adiabático decorrentes das elevadas taxas de deformação e da baixa condutividade térmica do material.

Esse tipo de morfologia está diretamente relacionado à formação de bandas de cisalhamento adiabático durante o processo de usinagem da liga Ti6Al4V. Nessas regiões, o material é submetido a níveis extremamente elevados de deformação plástica concentrada, resultando em forte refinamento microestrutural e aumento localizado da microdureza. Como consequência, os cavacos gerados nesse tipo de mecanismo de formação podem apresentar regiões com propriedades mecânicas distintas ao longo de sua estrutura. Esse comportamento contribui para explicar as variações observadas nos valores médios de microdureza dos cavacos medidos experimentalmente, uma vez que a presença de bandas de cisalhamento pode resultar em regiões significativamente encruadas intercaladas com regiões menos deformadas.

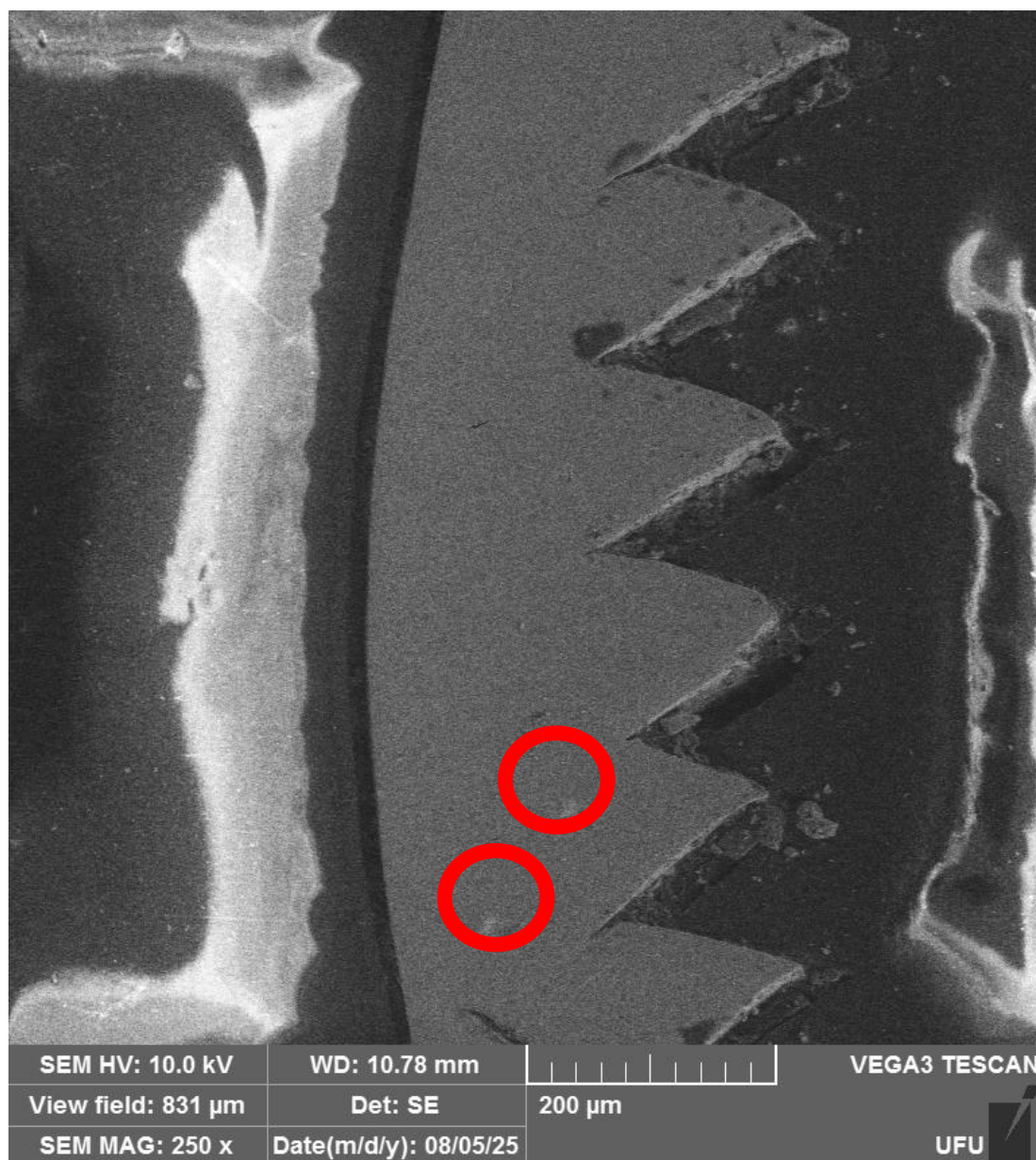


Figura 67 – Micrografia em MEV de cavaco gerado durante o torneamento da liga Ti6Al4V, evidenciando morfologia segmentada característica do material. Circulado em vermelho, é possível ver 2 indentações provenientes do ensaio de microdureza.

As diferenças observadas nos valores de microdureza dos cavacos produzidos pelas ferramentas lisas e texturizadas, indicando alteração nas condições de deformação e atrito na interface de corte, estão em concordância com Su et al. (2018), que verificaram que ferramentas contendo microrranhuras na superfície de saída foram capazes de reduzir a adesão de cavacos e modificar o comportamento tribológico na interface cavaco–ferramenta durante o torneamento da liga Ti6Al4V.

Por fim, a morfologia segmentada dos cavacos observada nas micrografias obtidas por MEV neste trabalho está de acordo com o comportamento amplamente reportado na literatura para a usinagem dessa liga, conforme observado por Su et al. (2018), que também identificaram a formação de cavacos segmentados durante o torneamento de Ti6Al4V, associada às elevadas taxas de deformação plástica e à ocorrência de bandas de cisalhamento adiabático características da usinagem de ligas de titânio.

Em síntese, a metalografia confirmou a microestrutura bifásica $\alpha+\beta$ característica da liga Ti6Al4V, enquanto a morfologia segmentada dos cavacos evidenciou a ocorrência de deformação plástica localizada e de bandas de cisalhamento adiabático. Os valores de microdureza indicaram o equilíbrio entre o encruamento causado pela deformação e o amolecimento térmico durante o corte, com diferenças mais perceptíveis no desbaste. Dessa forma, essas análises contribuem para a compreensão do comportamento termomecânico do material e permitem avaliar como as condições de usinagem influenciam a formação e as propriedades dos cavacos.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, aliados às análises e discussões realizadas, permitem estabelecer as seguintes conclusões.

- Na primeira etapa experimental, diferentes geometrias de textura foram avaliadas, observando-se reduções de até 41,94% na rugosidade em comparação com a ferramenta lisa. Em relação à força de usinagem, algumas configurações apresentaram redução de até 8,64%, evidenciando que a geometria das ranhuras exerce influência direta sobre o regime de contato cavaco–ferramenta.
- A segunda etapa experimental permitiu refinar a geometria das microtexturas por meio de um planejamento experimental voltado à otimização dos parâmetros geométricos das ranhuras. Nessa etapa, foram obtidas reduções adicionais nas forças de usinagem, atingindo até 8,02% de diminuição em relação à ferramenta convencional, e 6,80% na rugosidade.
- Na etapa final, comparando ferramentas lisas, ferramentas texturizadas e ferramentas texturizadas contendo lubrificante sólido MoS_2 , observou-se que o desempenho das ferramentas depende significativamente das condições de corte. Na condição de acabamento, ferramentas texturizadas sem lubrificante sólido apresentaram redução de aproximadamente 4,3% nas forças de usinagem, enquanto na condição de desbaste a combinação entre textura e lubrificante sólido resultou em reduções de até 57,9% nas forças de corte. Em relação à rugosidade superficial, foram observadas melhorias de até 8% no acabamento das superfícies usinadas com lubrificante, enquanto na condição de desbaste a combinação entre textura e lubrificante sólido resultou em reduções de 2,1%.
- A análise da vida da ferramenta indicou que as ferramentas texturizadas sem lubrificante sólido apresentaram o melhor desempenho geral, alcançando maiores volumes de material removido antes de atingir o critério de desgaste de flanco estipulado, especialmente na condição de acabamento com um aumento de 58%, enquanto na condição de desbaste foi de 24%.

- As análises em microscopia eletrônica indicaram que as microtexturas produzidas por laser permaneceram estruturalmente preservadas após os ensaios de usinagem (para testes de força e de vida), demonstrando boa integridade mecânica das ranhuras mesmo sob condições tribológicas severas.
- Observou-se que o efeito da texturização pode variar de acordo com o regime de corte e com as condições tribológicas estabelecidas na interface de usinagem, indicando que a eficiência da textura depende fortemente da combinação entre geometria da microestrutura, parâmetros de corte e material usinado.
- A presença de texturas contendo lubrificante sólido (MoS_2) demonstrou potencial para modificar as condições de lubrificação na interface cavaco-ferramenta. Entretanto, observou-se que a liberação do lubrificante pode ocorrer de forma não uniforme durante o processo de corte, o que pode gerar variações no comportamento tribológico ao longo da usinagem.
- O método experimental utilizado para a definição da geometria das microtexturas mostrou-se eficiente para a identificação de configurações geométricas com melhor desempenho no processo de usinagem. Esse tipo de abordagem pode ser utilizado no futuro para mapear geometrias de texturas específicas para diferentes materiais e condições de corte, permitindo o desenvolvimento de ferramentas de usinagem com texturas projetadas para aplicações particulares.
- A texturização superficial modificou as condições tribológicas da interface cavaco-ferramenta, reduzindo a intensidade dos fenômenos de adesão e proporcionando melhora no desempenho da ferramenta, principalmente na condição de acabamento.
- A adição de MoS_2 às microtexturas não resultou em aumento da vida da ferramenta. Embora tenha reduzido significativamente a adesão durante o desbaste, favoreceu a ocorrência de mecanismos de desgaste mais severos, como desgaste de cratera, trincas e quebra da aresta de corte.

- Os resultados demonstraram que a redução da adesão não implica, necessariamente, em maior vida da ferramenta durante a usinagem da liga Ti6Al4V, indicando que os efeitos da texturização e da lubrificação sólida dependem dos mecanismos de desgaste predominantes em cada regime de corte.
- O principal mecanismo de desgaste observados na condição de acabamento foi o adesivo, não sendo alterado com a presença da textura ou com a aplicação do MoS₂. Na condição de desbaste, além dos mecanismos de desgaste adesivo, observou-se forte ocorrência de lascamentos e quebras da aresta de corte das ferramentas, tanto na ferramenta lisa quanto na ferramenta com texturas, sendo mais severos com a presença do lubrificante sólido dissulfeto de molibdênio.
- A texturização superficial de ferramentas de corte demonstrou ser uma estratégia viável para modificar as condições tribológicas na interface cavaco-ferramenta, influenciando diretamente a força de usinagem, a rugosidade superficial e o comportamento de desgaste da ferramenta.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Investigar o desempenho das microtexturas em diferentes regimes de corte, incluindo variações mais amplas de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, a fim de ampliar o entendimento da influência das texturas nas condições tribológicas da interface cavaco–ferramenta.
- As barras de erro relativamente elevadas observadas em algumas texturas indicam maior variabilidade experimental dos dados obtidos, possivelmente associada à influência simultânea de múltiplos fatores de processo e às características heterogêneas das superfícies analisadas. Dessa forma, recomenda-se que estudos futuros investiguem de maneira mais aprofundada as causas dessa dispersão, visando uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos e o refinamento das condições experimentais.
- Estudar a influência de diferentes geometrias e orientações de texturas, como cavidades (*dimples*), padrões híbridos ou estruturas biomiméticas, comparando seu desempenho com o das ranhuras lineares utilizadas neste trabalho.
- Realizar análises tribológicas mais detalhadas da interface cavaco-ferramenta, incluindo medições de temperatura, análise química da interface e caracterização de camadas tribológicas formadas durante o corte.
- Desenvolver modelos numéricos ou simulações por elementos finitos que permitam prever o comportamento tribológico e o escoamento dos cavacos em ferramentas microtexturizadas.
- Investigar a possibilidade de integração industrial desse conceito, visando o desenvolvimento de ferramentas comerciais com microtexturas padronizadas, de maneira análoga aos atuais sistemas de quebra-cavacos utilizados em ferramentas de corte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, Yassmin Seid et al. The effect of laser micro-scale textured tools on the tool-chip interface performance and surface integrity during austenitic stainless-steel turning. **Applied Surface Science**, v. 510, p. 145455, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145455>
- ALAGAN, Nageswaran Tamil et al. 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, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.12.023>
- ARSLAN, A. et al. 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, 2016. <https://doi.org/10.1080/10408436.2016.1186597>
- ARSLAN, T.; KARPAT, Y.; KORKUT, T.; ÖZEL, T. Performance enhancement of cutting tools with surface textures and solid lubricants: a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 5–8, p. 1871–1887, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8351-y>
- ARULKIRUBAKARAN, D. et al. Effect of textured tools on machining of Ti-6Al-4V alloy under lubricant condition. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 6, p. 14230-14236, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.03.003>
- ARULKIRUBAKARAN, D. et al. Performance of surface textured tools during machining of Al-Cu/TiB₂ composite. **Measurement**, v. 137, p. 636-646, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.013>
- BAMMIDI, Roopsandeep et al. Towards an understanding of Ti-6Al-4V machining and machinability. **Materials Today: Proceedings**, v. 115, p. 289-292, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.094>
- BIBEYE Jahaziel, R., V. Krishnaraj, and B. Geetha Priyadarshini. "Investigation on influence of micro-textured tool in machining of Ti-6Al-4V alloy." **Journal of Mechanical Science and Technology** 36.4. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0334-0>
- BULGAKOVA, Nadezhda M. et al. A general continuum approach to describe fast electronic transport in pulsed laser irradiated materials: The problem of Coulomb explosion. **Applied physics A**, v. 81, n. 2, p. 345-356, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00339-005-3242-0>
- CHEN, Yadong et al. Study on the surface quality of CFRP machined by micro-textured milling tools. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 37, p. 114-123, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.021>
- COTTON, F. A.; WILKINSON, G. Advanced Inorganic Chemistry (fifth edition). **John Wiley & Sons**, 1988.
- DA SILVA, L. R. R.; COSTA, H. L. Tribological behavior of gray cast iron textured by maskless electrochemical texturing. **Wear**, v. 376, p. 1601-1610, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.028>

DA SILVA, W. M. et al. Effect of laser surface modification on the micro-abrasive wear resistance of coated cemented carbide tools. **Wear**, v. 302, n. 1-2, p. 1230-1240, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.035>

DE SOUZA, Felipe Chagas Rodrigues et al. Analysis of the influence of geometric parameters of laser-produced texturing on carbide tools in Ti6Al4V turning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-8, 2026. <https://doi.org/10.1007/s00170-026-17449-3>

DHAGE, Sagar; JAYAL, Anshu Dhar; SARKAR, Prabir. 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. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.100>

DHEERAJ, N. et al. Investigations into solid lubricant filled textured tools on hole geometry and surface integrity during drilling of aluminium alloy. **Materials Today: Proceedings**, v. 26, p. 991-997, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.163>

DINESH, S.; SENTHILKUMAR, V.; ASOKAN, P. Experimental studies on the cryogenic machining of biodegradable ZK60 Mg alloy using micro-textured tools. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 32, n. 9, p. 979-987, 2017. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1221096>

DINIZ, Anselmo Eduardo; DE OLIVEIRA, Adilson José. Optimizing the use of dry cutting in rough turning steel operations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 10, p. 1061-1067, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.03.001>

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artliber Editora, 2006.

DONACHIE, Matthew J. Titanium: a technical guide. 2. ed. **Materials Park, OH: ASM International**, 2000. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.ttg2.9781627082693>

DUAN, Ran et al. Experimental assessment of derivative cutting of micro-textured tools in dry cutting of medium carbon steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 9, p. 3531-3540, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0360-8>

DUAN, Ran et al. An approach to predict derivative-chip formation in derivative cutting of micro-textured tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 1, p. 973-982, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1285-y>

DUAN, Ran et al. Effect of derivative cutting on machining performance of micro textured tools. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 45, p. 544-556, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.037>

DURAIRAJ, Shanmugasundaram et al. An experimental study into the effect of microtextures on the performance of cutting tool. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 98, n. 1, p. 1011-1030, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2309-y>

FANG, Zhenglong; OBIKAWA, Toshiyuki. Cooling performance of micro-texture at the tool flank face under high pressure jet coolant assistance. **Precision Engineering**, v. 49, p. 41-51, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.008>

FENG, Yihua et al. Fabrication techniques and cutting performance of micro-textured selflubricating ceramic cutting tools by in-situ forming of Al₂O₃-TiC. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 68, p. 121-129, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.07.007>

FENG, Yihua et al. Study on secondary cutting phenomenon of micro-textured selflubricating ceramic cutting tools with different morphology parameters formed via in situ forming of Al₂O₃-TiC. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 9, p. 3821-3833, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04045-x>

FERMANN, Martin E.; GALVANAUSKAS, Almantas; SUCHA, Gregg (Ed.). **Ultrafast lasers: technology and applications**. CRC Press, 2002. <https://doi.org/10.1201/9780203910207>

FERNÁNDEZ-Lucio, P., et al. "Effects of laser-textured on rake face in turning PCD tools for Ti6Al4V." **journal of materials research and technology** 15. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.004>

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

FLIR. Use Low-Cost Materials to Increase Target Emissivity. **Teledyne FLIR**, 2015. Disponível em: <https://www.flir.com.br/discover/rd-science/use-low-cost-materials-to-increase-targetemissivity/> Acesso em: 15 fev. 2026.

FORK, R. L.; GREENE, B. I.; SHANK, Charles V. Generation of optical pulses shorter than 0.1 psec by colliding pulse mode locking. **Applied Physics Letters**, v. 38, n. 9, p. 671-672, 1981. <https://doi.org/10.1063/1.92500>

FOUATHIYA, Athmane, et al. "Experimental investigation of microtextured cutting tool performance in titanium alloy via turning." **Journal of Manufacturing Processes** 69. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.07.030>

FRANÇA, Pedro Henrique Pires et al. Thermal analysis of a proposed internally cooled machining tool system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 124, n. 7, p. 2807-2821, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10602-8>

GAJRANI, Kishor Kumar; SANKAR, M. Ravi. State of the art on micro to nano textured cutting tools. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 2, p. 3776-3785, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.274>

GAJRANI, Kishor Kumar; SANKAR, Mamilla Ravi; DIXIT, Uday Shanker. Environmentally friendly machining with MoS₂-filled mechanically microtextured cutting tools. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 32, n. 8, p. 3797-3805, 2018-A. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0732-5>

GAJRANI, Kishor Kumar; SURESH, Sompalli; SANKAR, Mamilla Ravi. Environmental friendly hard machining performance of uncoated and MoS₂ coated mechanical

microtextured tungsten carbide cutting tools. **Tribology International**, v. 125, p. 141-155, 2018-B. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.04.031>

GE, Dongliang et al. Effect of micro-textures on cutting fluid lubrication of cemented carbide tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 103, n. 9, p. 3887-3899, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03763-6>

GEETHA, M.; SINGH, A. K.; ASOKAMANI, R.; GOGIA, A. K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants: a review. **Progress in Materials Science**, v. 54, n. 3, p. 397–425, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004>

GHOSH, Priyanka; PACELLA, Manuela. Effect of laser texturing on the performance of ultra-hard single-point cutting tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 5, p. 2635-2648, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04829-1>

GOMES, Frederico Pimentel. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009.

GRGURAŠ, Damir; PUŠAVEC, Franci. Influence of rake face texturing on machining performance of carbide tools. **Procedia CIRP**, v. 81, p. 904-907, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.224>

HAO, Xiuqing et al. Cutting performance of textured polycrystalline diamond tools with composite lyophilic/lyophobic wettabilities. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 260, p. 1-8, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.049>

HARDELL, Jens; EFEOĞLU, Ihsan; PRAKASH, Braham. Tribological degradation of MoS₂-Ti sputtered coating when exposed to elevated temperatures. **Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces**, v. 4, n. 3, p. 121-129, 2010. <https://doi.org/10.1179/175158310X12626998129752>

HASEEBUDDIN, M. R.; PAL, B.; KESHAVAMURTHY, R.; SHANMUGANATAN, S. P. Influence of MoS₂ nano-filler additions on wear behavior of carbon fiber reinforced epoxy composites. **Advanced Composite Materials**, v. 34, n. 1, p. 34–48, 2025. <https://doi.org/10.1080/09243046.2024.2352895>

HNCARBIDE. **HNCarbide**. 2026. Disponível em: <https://hncarbide.eu/> Acesso em: 15 fev. 2026.

HOSOKAWA, Akira, Koki Kosugi, and Takashi Ueda. "Turning characteristics of titanium alloy Ti-6Al-4V with high-pressure cutting fluid." **CIRP Annals** 71.1. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.04.064>

HU, Jingshu, et al. "Research on Wear of Micro-Textured Tools in Turning GH4169 during Spray Cooling." **Lubricants** 11.10. 2023. <https://doi.org/10.3390/lubricants11100439>

ISO (International Standard Organization). **Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools**. ISO 3685, 1993. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/9151.html> Acesso em: 15 fev. 2026.

JAHAZIEL, Ronadson Bibeye, et al. "Improving dry machining performance of surface modified cutting tools through combined effect of texture and TiN-WS₂ coating." **Journal of Manufacturing Processes** 85. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.11.033>

JAWORSKA, Lucyna et al. Oxidation, graphitization and thermal resistance of PCD materials with the various bonding phases of up to 800 C. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 45, p. 109-116, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.04.003>

JESUDASS Thomas, KALAICHELVan. 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, 2018. <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1376070>

KANG, Zhengyang et al. Experimental investigation of concave and convex micro-textures for improving anti-adhesion property of cutting tool in dry finish cutting. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 5, n. 5, p. 583-591, 2018-A. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0060-3>

KANG, Zhengyang; JUN, Martin Byung-Guk; FU, Yonghong. Performance of cemented carbide cutting tools with volcano-like texture on rake face. In: **International Manufacturing Science and Engineering Conference**. American Society of Mechanical Engineers, 2018-B. <https://doi.org/10.1115/MSEC2018-6311>

KAROLCZAK, P., M. Kowalski, and K. Raszka. "The Effect of the use of cutting zone minimum quantity lubrication and wiper geometry inserts on titanium Ti6Al4V surface quality after turning." **Tribology in Industry** 43.2. 2021. <https://doi.org/10.24874/ti.1077.03.21.05>

KAUTEK, Wolfgang et al. Laser ablation of dielectrics with pulse durations between 20 fs and 3 ps. **Applied physics letters**, v. 69, n. 21, p. 3146-3148, 1996. <https://doi.org/10.1063/1.116810>

KAWASEGI, Noritaka et al. Development and machining performance of a textured diamond cutting tool fabricated with a focused ion beam and heat treatment. **Precision Engineering**, v. 47, p. 311-320, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.09.005>

KAWASEGI, Noritaka et al. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior. **Precision Engineering**, v. 33, n. 3, p. 248-254, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.07.005>

KHAN, Aqib Mashood, et al. "Holistic sustainability assessment of hybrid Al–GnP-enriched nanofluids and textured tool in machining of Ti–6Al–4V alloy." **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 112. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06371-x>

KHAN, Arslan et al. Review on the application of ultrasonic vibration-assisted turning in enhancing machinability of Ti-6Al-4V alloy. **Results in Materials**, v. 28, art. 100792, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100792>

KIM, Dong Min et al. Influence of a micropatterned insert on characteristics of the tool–workpiece interface in a hard turning process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 229, p. 160-171, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.018>

KING, Nathan et al. **Wet versus dry turning: a comparison of machining costs, product quality, and aerosol formation**. SAE Technical Paper, 2001. <https://doi.org/10.4271/2001-01-0343>

KLOCKE, Fritz. **Manufacturing Processes: Cutting/Transl. by Aaron Kuchle**. Springer, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11979-8>

KLOCKE, Fritz; KÖNIG, Wilfried. **Fertigungsverfahren: Abtragen, Generieren, Lasermaterialbearbeitung**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

KOMANDURI, R. et al. On the catastrophic shear instability in high-speed machining of an AISI 4340 steel. 1982. <https://doi.org/10.1115/1.3185807>

KONONENKO, T. V. et al. Fabrication of polycrystalline diamond refractive X-ray lens by femtosecond laser processing. **Applied Physics A**, v. 122, n. 3, p. 152, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9683-9>

KOSARAJU, Satyanarayana; ANNE, Venu Gopal. Optimal machining conditions for turning Ti-6Al-4V using response surface methodology. **Advances in Manufacturing**, v. 1, n. 4, p. 329-339, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-013-0047-9>

KRUEGER, Joerg; KAUTEK, Wolfgang. Femtosecond-pulse laser processing of metallic and semiconducting thin films. In: **Laser-Induced Thin Film Processing**. International Society for Optics and Photonics, 1995. <https://doi.org/10.1117/12.206276>

KUMAR, Ch Sateesh; PATEL, Saroj Kumar. Effect of WEDM surface texturing on Al₂O₃/TiCN composite ceramic tools in dry cutting of hardened steel. **Ceramics International**, v. 44, n. 2, p. 2510-2523, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.10.236>

KUMAR Mishra, S., S. Ghosh, and S. Aravindan. "Machining performance evaluation of Ti6Al4V alloy with laser textured tools under MQL and nano-MQL environments. **J Manuf Process** 53: 174–189." 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.014>

KUMAR, Ramanuj, and Ashok Kumar Sahoo. "Pulsating minimum quantity lubrication assisted high speed turning on bio-medical Ti-6Al-4V ELI Alloy: An experimental investigation." **Mechanics & Industry** 21.6. 2020 <https://doi.org/10.1051/meca/2020097>

LANE, B. M.; SHI, M., DOW, T. A.; SCATTERGOOD, R. **Diamond tool wear when machining Al6061 and 1215 steel**, *Wear*, v. 268, n. 11-12, p. 1434-1441, May 2010. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.02.019>

LANGHE INDUSTRY CO., LTD. **Ti-6Al-4V Titanium Alloy: Properties and Applications**. 2025. Disponível em: <https://langhe-industry.com/ti-6al-4v-titanium-alloy/> Acesso em: 15 fev. 2026.

LEKSYCKI, Kamil, and Jolanta B. Królczyk. "Comparative assessment of the surface topography for different optical profilometry techniques after dry turning of Ti6Al4V titanium alloy." **Measurement** 169. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108378>

LI, Zeng Qiang; WU, Qi; WANG, Jun. Ultrashort pulsed laser micromachining of polycrystalline diamond. In: **Advanced materials research**. Trans Tech Publications Ltd, 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.497.220>

- LI, Ning et al. Experimental investigation with respect to the performance of deep submillimeter-scaled textured tools in dry turning titanium alloy Ti-6Al-4V. **Applied surface science**, v. 403, p. 187-199, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.166>
- LI, Qiang et al. Evaluation of the machinability of titanium alloy using a micro-textured ball end milling cutter. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 98, n. 5, p. 2083-2092, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2319-9>
- LI, Qinghua et al. Investigation on cutting performance of micro-textured cutting tools. **Micromachines**, v. 10, n. 6, p. 352, 2019. <https://doi.org/10.3390/mi10060352>
- LI, Jinhua, et al. "Application of Micro-Textured Surface Prepared by an Integrated Molding Process in Sustainable Turning of Ti-6al-4v." Available at SSRN 4084388. 2022. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4084388>
- LIAN, Yunsong et al. Experimental investigation and mechanism analysis of tungsten disulfide soft coated micro-nano textured self-lubricating dry cutting tools. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 5, n. 2, p. 219-230, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0022-9>
- LIAN, Yunsong; CHEN, Huifeng; MU, Chenliang. Performance of microtextured tools fabricated by inductively coupled plasma etching in dry cutting tests on medium carbon steel workpieces. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 6, n. 2, p. 175-188, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00088-3>
- LIANG, Xiaoliang, et al. "Tool wear-induced microstructure evolution in localized deformation layer of machined Ti-6Al-4V." **Journal of Materials Science** 55.8. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-04214-z>
- LIANG, Xiaoliang, et al. "Tool wear induced the gradient distribution of surface integrity with process-microstructure-property characteristics after turning Ti-6Al-4 V." **Journal of Manufacturing Processes** 70. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.09.007>
- LIMA, Milton Sergio Fernandes de. Laser beam welding of titanium nitride coated titanium using pulse-shaping. **Materials Research**, v. 8, p. 323-328, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392005000300017>
- LIU, Yayun et al. Wear resistance of carbide tools with textured flank-face in dry cutting of green alumina ceramics. **Wear**, v. 372, p. 91-103, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.001>
- LIU, Yayun et al. Effect of nano-scale texture pretreatment on wear resistance of WC/Co tools with/without TiAlN coated flank-face in dry turning of green Al₂O₃ ceramics. **Ceramics International**, v. 44, n. 17, p. 21176-21187, 2018-A. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.163>
- LIU, Yayun et al. Effect of texture parameters on cutting performance of flank-faced textured carbide tools in dry cutting of green Al₂O₃ ceramics. **Ceramics International**, v. 44, n. 11, p. 13205-13217, 2018-B. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.146>

LIU, Xin et al. Performances of micro-textured WC-10Ni3Al cemented carbides cutting tool in turning of Ti6Al4V. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 84, p. 104987, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.104987>

LOTFI, Mohammad, Saeid Amini, and Javad Akbari. "Surface integrity and microstructure changes in 3D elliptical ultrasonic assisted turning of Ti-6Al-4V: FEM and experimental examination." **Tribology International** 151. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106492>

LÜTJERING, Gerd; WILLIAMS, James C. Titanium. 2. ed. **Berlin: Springer**, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73036-1>

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. Editora Blucher, 2015.

MACHADO, Alisson R. et al. State of the art of tool texturing in machining. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 117096, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117096>

MAPAL, **Catálogo de Ferramentas de torneamento**. Disponível em: https://mapal.com/medias/sys_master/root/hd1/h2f/8837573312542/190226_Drehen_PT/190226-Drehen-PT.pdf Acesso em: 15 fev. 2026.

MCCULLOCH, Q.; GIGAX, J. G.; HOSEMAN, P. Femtosecond laser ablation for mesoscale specimen evaluation. **JOM**, v. 72, n. 4, p. 1694-1702, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04045-3>

MISHRA, Sarvesh Kumar; GHOSH, Sudarsan; ARAVINDAN, Sivanandam. 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, 2018A. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.04.011>

MISHRA, Sarvesh Kumar; GHOSH, Sudarsan; ARAVINDAN, Sivanandam. Characterization and machining performance of laser-textured chevron shaped tools coated with AlTiN and AlCrN coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 334, p. 344-356, 2018-B. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.11.061>

MISHRA, Sarvesh Kumar; GHOSH, Sudarsan; ARAVINDAN, Sivanandam. 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, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.01.006>

MYERS, Raymond H.; MONTGOMERY, Douglas C.; ANDERSON-COOK, Christine M. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016

NIKETH, S.; SAMUEL, G. L. Surface texturing for tribology enhancement and its application on drill tool for the sustainable machining of titanium alloy. **Journal of cleaner production**, v. 167, p. 253-270, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.178>

NIKETH, S.; SAMUEL, G. L. Drilling performance of micro textured tools under dry, wet and MQL condition. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 32, p. 254-268, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.02.012>

NORMUNG, D. I. für. DIN 8589–Fertigungsverfahren Spanen. In **Teil 11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug: Einordnung, Unterteilung, Begriffe**. Beuth Verlag Berlin. 2003.

OLANDER, Petra; HEINRICHS, Jannica. On wear of WC–Co cutting inserts in turning of Ti6Al4V: a study of wear surfaces. **Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces**, v. 15, n. 3, p. 181–192, 2021. <https://doi.org/10.1080/17515831.2020.1830251>

ORRA, Kashfull; CHOUDHURY, Sounak K. Tribological aspects of various geometrically shaped micro-textures on cutting insert to improve tool life in hard turning process. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 31, p. 502-513, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.12.005>

ÖZTÜRK, Erkan. "FEM and statistical-based assessment of AISI-4140 dry hard turning using micro-textured insert." **Journal of Manufacturing Processes** 81. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.060>

PAN, Chen et al. Study on surface roughness of Gcr15 machined by micro-texture PCBN tools. **Machines**, v. 6, n. 3, p. 42, 2018. <https://doi.org/10.3390/machines6030042>

PANG, Minghua; LIU, Xiaojun; LIU, Kun. Effect of conical micro-grooved texture on tool–chip friction property and cutting performance of WC–TiC/Co cemented carbide tools. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 233, n. 5, p. 791-804, 2019. <https://doi.org/10.1177/1350650118804907>

PATEL, Kaushalendra et al. Effect of Micro-textured tool parameters on forces, stresses, wear rate, and variable friction in titanium alloy machining. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 142, n. 2, p. 021007, 2020. <https://doi.org/10.1115/1.4045554>

PATEL, Kaushalendra V.; SHAH, Suril R.; ÖZEL, Tuğrul. Orthogonal cutting of alloy steel 4340 with micro-grooved cutting tools. **Procedia CIRP**, v. 82, p. 178-183, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.276>

PEIXOTO, Augusto César Santos et al. Machining gray cast iron with internally cooled tools: performance, wear, and sustainability assessment. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 138, n. 5, p. 2605-2626, 2025. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15610-y>

PRATAP, Ashwani; PATRA, Karali; DYAKONOV, Aleksandr A. On-machine texturing of PCD micro-tools for dry micro-slot grinding of BK7 glass. **Precision Engineering**, v. 55, p. 491-502, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.11.004>

PRATAP, Ashwani; PATRA, Karali. Combined effects of tool surface texturing, cutting parameters and minimum quantity lubrication (MQL) pressure on micro-grinding of BK7 glass. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 54, p. 374-392, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.024>

PREUSS, S.; DEMCHUK, A.; STUKE, M. Sub-picosecond UV laser ablation of metals. **Applied Physics A**, v. 61, n. 1, p. 33-37, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF01538207>

RAO, D. Nageswara; KRISHNA, P. Vamsi. The influence of solid lubricant particle size on machining parameters in turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 1, p. 107-111, 2008.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.07.007>

RATHOD, Pankaj et al. Performance evaluation of novel micro-textured tools in improving the machinability of aluminum alloy (Al 6063). **Procedia Technology**, v. 23, p. 296-303, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.protec.2016.03.030>

REDDY, Rohit G.; KAPOOR, Shiv G.; DEVOR, Richard E. A mechanistic force model for contour turning. **J. Manuf. Sci. Eng.**, v. 122, n. 3, p. 398-405, 2000.

<https://doi.org/10.1115/1.1285900>

REIF, Jürgen; COSTACHE, Florenta. Femtosecond laser interaction with solid surfaces: explosive ablation and self-assembly of ordered nanostructures. **Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics**, v. 53, p. 227-251, 2006. [https://doi.org/10.1016/S1049-250X\(06\)53008-3](https://doi.org/10.1016/S1049-250X(06)53008-3)

SAMAD, Ricardo Elgul et al. Ultrashort laser pulses machining. **Laser Pulses-Theory, Technology, and Applications**, p. 143-174, 2012. <http://dx.doi.org/10.5772/46235>

SASI, Roshan; SUBBU, S. Kanmani; PALANI, I. A. 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, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.118>

SAWANT, Mayur S.; JAIN, N. K.; PALANI, I. A. Influence of dimple and spot-texturing of HSS cutting tool on machining of Ti-6Al-4V. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 261, p. 1-11, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.05.032>

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.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.138>

SHARMA, V.; PANDEY, P.M. Geometrical design optimization of hybrid textured self-lubricating cutting inserts for turning 4340 hardened steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89, n. 5, p. 1575-1589, 2017.

<https://doi.org/10.1007/s00170-016-9163-6>

SHARMA, R.; SWASTIK P. and Ravi N. "Comparison, validation, and prediction of machinability aspects of textured and non-textured cutting inserts." **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering** 45.2. 2023.

<https://doi.org/10.1007/s40430-022-03953-6>

SIJU, Amal S., and Sachin D. Waigaonkar. "Effects of rake surface texture geometries on the performance of single-point cutting tools in hard turning of titanium alloy." **Journal of Manufacturing processes** 69. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.07.041>

SIJU, Amal S., Sandeep Jose, and Sachin D. Waigaonkar. "Experimental analysis and characterisation of chip segmentation in dry machining of Ti-6Al-4V alloy using inserts with hybrid textures." **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology** 36. 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.12.004>

SINGH, Rupinder; DUREJA, J. S.; DOGRA, Manu. Performance evaluation of textured carbide tools under environment-friendly minimum quantity lubrication turning strategies. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, n. 2, p. 87, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1586-1>

SINGH, Rupinder et al. Wear behavior of textured tools under graphene-assisted minimum quantity lubrication system in machining Ti-6Al-4V alloy. **Tribology International**, v. 145, p. 106183, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106183>

SIVAIAH, P.; BODICHERLA, Uma. Effect of surface texture tools and minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in CNC turning of AISI 52100 steel. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series C**, v. 101, n. 1, p. 85-95, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40032-019-00512-2>

SONG, Wenlong et al. Experimental study on the cutting temperature of textured carbide tool embedded with graphite. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 93, n. 9, p. 3419-3427, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0683-5>

SOTILLO, Belén et al. Visible to infrared diamond photonics enabled by focused femtosecond laser pulses. **Micromachines**, v. 8, n. 2, p. 60, 2017. <https://doi.org/10.3390/mi8020060>

SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. Dry machining: machining of the future. **Journal of materials processing technology**, v. 101, n. 1-3, p. 287-291, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00445-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00445-3)

STOETERAU, Rodrigo L.; JANSSEN, Andreas; MALLMANN, Guilherme. Analysis of dimple textured surfaces on cutting tools. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 39, n. 10, p. 3989-3996, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40430-016-0692-6>

STUART, B. C. et al. Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses. **Physical review letters**, v. 74, n. 12, p. 2248, 1995. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.2248>

SU, Yongsheng et al. Cutting performance of micro-textured polycrystalline diamond tool in dry cutting. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 27, p. 1-7, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.03.013>

SU, Yongsheng et al. Cutting mechanism and performance of high-speed machining of a titanium alloy using a super-hard textured tool. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 34, p. 706-712, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.07.004>

SUGIHARA, Tatsuya; ENOMOTO, Toshiyuki. Performance of cutting tools with dimple textured surfaces: a comparative study of different texture patterns. **Precision Engineering**, v. 49, p. 52-60, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.009>

SUGIHARA, Tatsuya; NISHIMOTO, Yuki; ENOMOTO, Toshiyuki. Development of a novel cubic boron nitride cutting tool with a textured flank face for high-speed machining of Inconel 718. **Precision Engineering**, v. 48, p. 75-82, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.11.007>

SUKAYLO, V. A. et al. Development and verification of a computer model for thermal distortions in hard turning. **Journal of materials processing technology**, v. 155, p. 18211827, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.169>

SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP. **General Catalog – Cutting Tools**. 2025-2026. Disponível em: <https://www.sumitool.com/br/downloads/cutting-tools/general-catalog/> Acesso em: 15 fev. 2026.

SUN, Jialin et al. 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, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8452-4>

TAYISEPI, Nicholas et al. Specific energy use and chip morphology characterisation during CNC lathe finish machining of titanium alloy–Ti6Al4V. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 12, p. 1-11, 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18205083>

TERE, Rajesh Babu, and G. L. Samuel. "EFFECT OF TEXTURED CUTTING INSERTS IN MICRO-TURNING OF TI-6AL-4V ALLOYS." **Materials & Technologies/Materiali in Tehnologije** 57.5. 2023. <https://doi.org/10.17222/mit.2023.828>

TOENSHOFF, Hans Kurt; DENKENA, Berend. Basics of cutting and abrasive processes. 2013. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33257-9>

TRENT, Edward M.; WRIGHT, Paul K. **Metal cutting**. Butterworth-Heinemann, 2000. <https://doi.org/10.1016/B978-075067069-2/50007-3>

UHLMANN, Eckart, and D. Schröter. "Micro-texture trajectory dependent pressure distribution of CVD diamond thick film cutting tools during turning of Ti-6Al-4V." **Procedia CIRP** 102. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.09.009>

UHLMANN, Eckart, D. Schröter, and Eric Gärtner. "Micro-texture dependent temperature distribution of CVD diamond thick film cutting tools during turning of Ti-6Al-4V." **Procedia CIRP** 108. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.075>

UHLMANN, Eckart, and Danny Schröter. "Process behaviour of micro-textured CVD diamond thick film cutting tools during turning of Ti-6Al-4V." **Procedia CIRP** 87. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.014>

UPADHYAYA, G. S. Materials science of cemented carbides: an overview. **Materials & Design**, v. 22, n. 6, p. 483–489, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00007-3)

VASUMATHY, D.; MEENA, Anil. Influence of micro scale textured tools on tribological properties at tool-chip interface in turning AISI 316 austenitic stainless steel. **Wear**, v. 376, p. 1747-1758, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.024>

VIGNESH, G. et al. Experimental analysis on turning of AISI 4340 steel using non-textured, dimple textured and MoS2 coated dimple textured carbide cutting inserts at the rack surface. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 2616-2620, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.125>

VYAS, A.; SHAW, M. C. Mechanics of saw-tooth chip formation in metal cutting. 1999. <https://doi.org/10.1115/1.2831200>

WEI, Yuan et al. Effects of micro textured sapphire tool regarding cutting forces in turning operations. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 4, n. 2, p. 141-147, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0017-y>

WELSCH, Gerhard; BOYER, Rodney; COLLINGS, E. W. (ed.). Materials properties handbook: titanium alloys. **Materials Park, OH: ASM International**, 1994.

WU, Han et al. CEL FEM Investigation of effects of microgrooved cutting tools in high speed machining of AISI 1045 steel. In: **International Manufacturing Science and Engineering Conference**. American Society of Mechanical Engineers, 2017. <https://doi.org/10.1115/MSEC2017-2932>

XING, Youqiang et al. Experimental assessment of laser textured cutting tools in dry cutting of aluminum alloys. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 138, n. 7, 2016. <https://doi.org/10.1115/1.4032263>

XING, Youqiang et al. Analysis of tool-chip interface characteristics of self-lubricating tools with nanotextures and WS 2/Zr coatings in dry cutting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 97, 2018-A. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2054-2>

XING, Youqiang et al. Micro-channels machining on polycrystalline diamond by nanosecond laser. **Optics & Laser Technology**, v. 108, p. 333-345, 2018-B. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.07.024>

YANG, Shuca; YU, Song; HE, Chunsheng. The surface integrity of titanium alloy when using micro-textured ball-end milling cutters. **Micromachines**, v. 10, n. 1, p. 21, 2018. <https://doi.org/10.3390/mi10010021>

YANG, Shuca; YU, Song; HE, Chunsheng. The surface integrity of titanium alloy when using micro-textured ball-end milling cutters. **Micromachines**, v. 10, n. 1, p. 21, 2019-A. <https://doi.org/10.3390/mi10010021>

YANG, Yinfei et al. Fabrication of CVD diamond micro-milling tool by hybrid machining of laser-induced graphitization and precision grinding. **Ceramics International**, v. 45, n. 18, p. 24127-24136, 2019-B. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.08.121>

YANG, Shuca; et al. Micro-texture design criteria for cemented carbide ball-end milling cutters. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 34, n. 1, p. 127-136, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-1212-2>

YU, Qianxi, et al. "Performances of concave and convex microtexture tools in turning of Ti6Al4V with lubrication." **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 109. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05656-5>

ZALLOUM, Othman HY et al. On femtosecond micromachining of HPHT single-crystal diamond with direct laser writing using tight focusing. **Optics express**, v. 18, n. 12, p. 1312213135, 2010. <https://doi.org/10.1364/OE.18.013122>

ZE, Wu et al. Performance of the self-lubricating textured tools in dry cutting of Ti-6Al4V. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 62, n. 9, p. 943-951, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3853-x>

ZHANG, Kedong et al. Improving dry machining performance of TiAlN hard-coated tools through combined technology of femtosecond laser-textures and WS2 soft-coatings. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 30, p. 492-501, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.018>

ZHANG, Zhao et al. 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, 2019. <https://doi.org/10.1142/S021798491950283X>

ZHANG, Liang, et al. "Enhancing cutting performance of uncoated cemented carbide tools by joint-use of magnetic nanofluids and micro-texture under magnetic field." **Journal of Materials Processing Technology** 284. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116764>

ZHANG, Na et al. Study of the effect of surface laser texture on tribological properties of cemented carbide materials. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 234, n. 6-7, p. 993-1006, 2020. <https://doi.org/10.1177/0954405419896116>

ZHANG, Na, Fazhan Yang, and Guohua Liu. "Cutting performance of micro-textured WC/Co tools in the dry cutting of Ti-6Al-4V alloy." **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 107. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05161-9>

ZHANG, Kedong, et al. "Study on the cooling and lubrication mechanism of magnetic field-assisted Fe₃O₄ CNTs nanofluid in micro-textured tool cutting." **Journal of Manufacturing Processes** 85. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.11.081>

ZHOU, Chichi et al. The coupling effect of micro-groove textures and nanofluids on cutting performance of uncoated cemented carbide tools in milling Ti-6Al-4V. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 271, p. 36-45, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.021>