



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Faculdade de Engenharia Mecânica

FELIPE CHAGAS RODRIGUES DE SOUZA

**Efeito da texturização em ferramentas de PCD no  
torneamento de Alumínio 2011-T4**

Uberlândia – MG

2021

FELIPE CHAGAS RODRIGUES DE SOUZA

Efeito da texturização em ferramentas de PCD no torneamento de Alumínio 2011-T4

**Dissertação** apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de **mestre 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

2021

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S729 Souza, Felipe Chagas Rodrigues de, 1992-  
2022 Efeito da texturização em ferramentas de PCD no  
torneamento de Alumínio 2011-T4 [recurso eletrônico] /  
Felipe Chagas Rodrigues de Souza. - 2022.

Orientador: Álisson Rocha Machado.

Coorientador: Wagner de Rossi.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em:

<http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.79> Inclui  
bibliografia. Inclui ilustrações.

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

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



**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.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 601, COPEM				
Data:	26/01/2022	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	13:00
Matrícula do Discente:	12012EMC006				
Nome do Discente:	Felipe Chagas Rodrigues de Souza				
Título do Trabalho:	Efeito da texturização de ferramentas de PCD para o torneamento de Alumínio 2011-T4				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	"Torneamento materiais metálicos com ferramentas de corte texturizadas por laser"				

Reuniu-se por meio de webconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Márcio Bacci da Silva - FEMEC/UFU; Marcelo Bertolete Carneiro/UFES e Álisson Rocha Machado - FEMEC/UFU, orientador do candidato. Ressalta-se que os Prof. Márcio Bacci da Silva, Álisson Rocha Machado e o Discente participaram da defesa por meio de webconferência desde a cidade de Uberlândia/MG, Prof. Marcelo Bertolete Carneiro desde a cidade de Vitória/ES, em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, 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(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

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

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 **Marcelo Bertolete Carneiro, Usuário Externo**, em 26/01/2022, às 13:13, 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 **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/01/2022, às 13:14, 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 26/01/2022, às 15:33, 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](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3296611** e o código CRC **79DC959D**.

---

## AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Marcos Antônio R. de Souza, por sempre ter me apoiado em meus estudos e por ser uma referência em quem posso me inspirar.

Ao meu orientador, Alisson R. Machado, e também meu coorientador, Wagner de Rossi e toda sua equipe do IPEN-USP, que tornaram possível a realização deste projeto.

Ao professor Leonardo R. R. Silva, que possibilitou meu acesso à temática abordada, e aos demais professores Eder Costa e Wisley Sales (em memória), que participaram da construção do conhecimento presente neste trabalho.

Aos colegas e amigos Pedro H. Pires, Lucas Melo e Felipe dos Anjos, pelo grande apoio e companheirismo durante toda a jornada.

Ao amigo e parceiro de temática Leandro Carvalho, que contribuiu com conselhos e sugestões que foram fundamentais no projeto.

À Mapal, em especial ao CEO Conrado Couto e ao engenheiro Adriano Soares, que tiveram uma participação essencial nos insumos deste projeto.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), pela oportunidade concedida.

Agradeço também a toda comunidade que compõe a UFU, incluindo os professores e técnicos, além de colegas, que colaboraram em algum momento, em especial o Rafael R. Heilbuth, engenheiro técnico no Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura da FEQUI-UFU pelas análises de MEV.

**“Dúvida é o princípio da sabedoria” Aristóteles 347 a.C.**

## RESUMO

Nos últimos anos, pesquisadores buscaram compilar estudos sobre os efeitos da texturização em ferramentas de corte. Nota-se uma clara convergência entre as conclusões, todavia, existem ainda parâmetros cujos resultados divergem drasticamente entre os autores. Uma das possíveis causas de resultados tão divergentes consiste na diferença entre as propriedades dos materiais estudados por cada pesquisador. Logo, os efeitos das texturas nos materiais estudados em menor número na literatura acabam sendo mascarados, como é o caso do alumínio, um material que apesar de ser amplamente utilizado nas indústrias, corresponde à apenas 16 % dos materiais estudados nos últimos 5 anos. A aplicação de ferramentas texturizadas na usinagem do alumínio aliada a uma ferramenta de alta resistência como o PCD torna-se altamente viável, pois nesta combinação não há desgaste significativo, ao contrário da maioria dos casos em que há um desgaste rápido na ferramenta que consome a textura em um pequeno percurso de usinagem, diminuindo ou anulando seu efeito. Assim, este trabalho realizou testes de torneamento da liga de Alumínio 2011-T4, com ferramentas de PCD com diferentes tipos de texturas (canais paralelos e perpendiculares à aresta principal de corte), variando-se a condição de lubrificação (seco e com aplicação de  $\text{MoS}_2$ ) e a velocidade de corte. Testes com ferramentas sem texturas (lisas) também foram conduzidos para comparação. As texturas foram usinadas por laser femtossegundos de Ti:safira, variando-se a direção, profundidade e largura dos canais. Os parâmetros considerados nos experimentos foram força de corte, temperatura de usinagem, rugosidade das superfícies usinadas e morfologia dos cavacos. Foram observadas as condições favoráveis à produção da textura e o comportamento das mesmas durante o torneamento. As texturas beneficiam a quebra do cavaco e conseqüentemente a dissipação do calor gerado. A presença de lubrificante evitou o empastamento de material dentro das texturas, reduzindo o atrito, portanto o  $\text{MoS}_2$  favoreceu o corte em relação à redução das forças e temperaturas, porém não houve aprimoramento em relação à rugosidade da peça. Também foi constatado que as texturas exerceram grande influência na força de avanço, mas esta é apenas uma pequena parcela da força de usinagem, assim, a pequena influência na força de corte foi o que determinou o resultado final na força de usinagem. As texturas perpendiculares à aresta de corte com lubrificante foram as que apresentaram os melhores resultados em relação às ferramentas sem textura: a textura com dimensões menores reduziu a força de usinagem em mais de 7 %, e a temperatura em 9 %, enquanto a textura de dimensões maiores reduziu a rugosidade  $R_a$  da peça em 49 %.

**Palavras-chave:** Texturização a laser, Ferramentas de PCD, Alumínio 2011-T4,  $\text{MoS}_2$ .

## ABSTRACT

In recent years, researchers have tried to compile studies on the effects of texturing on cutting tools. There is a clear convergence of the conclusions, however, there are still parameters whose results drastically diverge among the authors. One of the possible causes of such divergent results is the difference between the properties of the materials studied by each researcher. Therefore, the effects of textures on materials studied in smaller numbers in the literature end up being masked, as is the case of aluminum, a material that, despite being widely used in industries, corresponds to only 16% of the materials studied in the last 5 years. The application of textured tools in aluminum machining combined with a high-strength tool such as PCD becomes highly viable, because in this combination there is no significant tool wear, unlike in most cases where there is rapid tool wear that consumes the texture in a short machining path, nullifying its effect. Thus, this work carried out turning tests in 2011-T4 aluminum alloy with PCD tools with different types of texture (parallel and perpendicular channels to the main cutting edge), varying the lubri-cooling condition (dry and with the addition of MoS<sub>2</sub>) and cutting speed. Tests with non-textured tools were also performed for comparisons. The textures were machined by a femtoseconds Ti:sapphire laser, varying the direction, depth and width of the channels. The output parameters considered in the experiments were the cutting forces, cutting temperature, workpiece surface roughness and chip morphology. Favorable conditions for texture production and their behavior during turning were observed. The textures helped to break the chips and consequently the dissipation of the heat generated. The presence of lubricant avoided the material clogging inside the textures, reducing friction, so the MoS<sub>2</sub> favored the cut in relation to the reduction of forces and temperatures, however there was no improvement in relation to the roughness of the piece. It was observed that textures have a large influence on the feed force, but this component was only a small percentage of the machining force, and therefore the small influence on the cutting force was what determined the final result in the machining force. Textures with channels perpendicular to the main cutting edge with lubricant showed the best results when compared to non-textured tools: the textures with smaller dimensions reduced the machining force by more than 7 %, and the temperature by 9 %, while the textures with larger dimensions reduced the surface roughness parameter Ra by 49 %.

**Keywords:** Laser texturing, PCD tools, Aluminum 2011-T4 alloy, MoS<sub>2</sub>.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	7
1.1 Objetivo Geral.....	10
1.2 Objetivo Específico.....	10
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	11
2.1 Usinagem e Torneamento.....	11
2.2 A liga de Alumínio 2011-T4.....	13
2.3 Diamante Policristalino – PCD.....	16
2.4 Texturas em Ferramentas de Corte.....	18
2.4.1 Geometria das Texturas.....	19
2.4.2 Dimensões das Texturas e seus Efeitos na Usinagem.....	21
2.4.3 Características Tribológicas Resultante das Texturas.....	23
2.4.4 Redução do Efeito de Adesão na Ferramenta Texturizada.....	25
2.4.5 Lubrificante Sólido em Ferramentas Texturizadas.....	28
2.4.6 Efeito de Corte Derivativo Ocasionado por Texturas.....	30
2.4.7 Efeito nas Forças de Usinagem.....	31
2.4.8 Efeito na Temperatura de Usinagem.....	34
2.4.9 Efeito na Rugosidade da Peça.....	37
2.5 Laser Femtossegundos.....	38
2.5.1 Laser Femtossegundos em PCD.....	43
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	45
3.1 Equipamentos e Insumos.....	45
3.2 Barra de Alumínio 2011-T4.....	47
3.3 Ferramentas de Corte de PCD e seu Suporte.....	50
3.4 Produção da Textura.....	52
3.5 Aplicação do Lubrificante Sólido nas Texturas.....	55
3.6 Parâmetros de Corte e Ensaio.....	58
3.6.1 Análise Metalográfica e Microdureza dos Cavacos.....	59
3.6.2 Análise de Força.....	59
3.6.3 Análise de Temperatura.....	59
3.6.4 Análise da Rugosidade da Superfície da Peça Usinada.....	62
3.7 Análise Estatística.....	62
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	64
4.1 Textura Produzida.....	64
4.2 Texturas Pós-Testes.....	69
4.3 Morfologias dos Cavacos.....	72
4.4 Forças de Usinagem.....	80
4.5 Temperatura de Usinagem.....	87
4.6 Rugosidade da Peça Usinada.....	92
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	100
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	102
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	103
<b>7 APÊNDICES</b> .....	116

## 1 INTRODUÇÃO

Por ser um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria manufatureira, a usinagem tem um grande destaque entre pesquisadores, haja vista que, otimizar seus processos é um constante desafio. A usinagem se trata de um processo no qual há a remoção de material a fim de se obter geometrias e acabamentos através das mais diversas operações, em que tal material removido é chamado de cavaco (Trent e Wright, 2000). Na usinagem convencional, o cavaco é formado pelo movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça trabalhada. Portanto, entender os fenômenos que ocorrem na região da interface cavaco/ferramenta é a chave para guiar os estudos e propostas de otimizações das operações de usinagem.

Quebra-cavacos, que hoje são amplamente utilizados nas indústrias, tiveram sua origem a partir de projetos de pesquisa para então serem produzidos diretamente pelos fabricantes de ferramentas. De forma análoga temos uma nova tendência de proposta para otimizar o contato cavaco/ferramenta: a texturização das ferramentas de corte. A texturização encaminha para ser um recurso também produzido diretamente pelos fabricantes, para então ser usado comercialmente.

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

Nos últimos anos, alguns pesquisadores buscaram compilar estudos dos efeitos da texturização em *reviews*, como por exemplo, nos trabalhos de Sharma, Panday e Pulak (2016), Arslan et al. (2016) e Gajrani e Sankar (2017), sendo o mais recente e completo, o trabalho de Machado et al. (2021). Através destes trabalhos, há uma clara convergência entre as conclusões, todavia, existem ainda, parâmetros cujos resultados divergem drasticamente entre os autores. Para exemplificar: enquanto os autores Dhage, Jayal e Sarkar. (2019) concluíram que *grooves* lineares são mais eficientes tribologicamente para a direção paralela à aresta de corte, os autores Mishra, Ghosh e Aravindan (2019) encontraram resultados em que tal direção eleva o atrito no corte, piorando a usinagem. Uma das possíveis causas de resultados tão diferentes consiste na grande diferença entre as propriedades dos materiais estudados em cada trabalho, em que no primeiro foi aço carbono, enquanto no segundo foi Ti6Al4V,

materiais que relativamente possuem uma grande diferença entre suas propriedades mecânicas (destacando dureza, resistência ao cisalhamento e densidade). Os trabalhos como de Sharma e Panday et al. (2016) compilaram conclusões sem considerar os materiais usinados, prevalecendo apenas os resultados concordantes encontrados em maior número. Logo, os efeitos da usinagem para materiais menos estudados acabam sendo mascarados, como é o caso do alumínio, um material amplamente utilizado nas indústrias, mas que, segundo os estudos de Machado et al. (2021), correspondem à apenas 16 % dos materiais estudados nos últimos 5 anos quanto ao efeito da texturização de ferramentas de corte.

Até o presente momento, muitas texturas se mostraram capazes de aperfeiçoar o corte do material com grande relevância. Porém, na maioria dos casos, há o desgaste rápido da ferramenta, que consome a textura produzida na sua superfície em um pequeno percurso de usinagem. Desta forma, a viabilidade da textura se justifica apenas quando as texturas forem suficientemente profundas para compensar tal desgaste, ou quando o desgaste da ferramenta for suficientemente baixo para a textura se manter presente e atuante durante longos percursos da ferramenta. Uma combinação típica para este segundo caso é a usinagem do alumínio com ferramentas de diamante policristalino PCD, uma vez que possuem desgaste insignificante para esta situação, e assim, caso tais ferramentas estejam texturizadas, as texturas irão permanecer presentes e atuantes durante praticamente todo o processo de corte. Além disso, assim como o alumínio, as pesquisas em texturização em ferramentas de PCD ainda representam uma fração modesta dos estudos na literatura (Machado et al, 2021).

Tal lacuna na literatura instiga pesquisas que possam abordar os efeitos da texturização de forma a correlacionar também a propriedades dos materiais envolvidos (peça e ferramenta de corte). O foco de pesquisas em métodos convencionais de usinagem consiste em buscar resultados que possam contribuir para aplicações na indústria manufatureira. Logo, buscando alinhar a aplicação em um material muito importante como o alumínio, mas ainda pouco estudado em texturização, da mesma forma as ferramentas de PCD, muito pouco consideradas.

Kawasegi et al. (2017), que trabalharam com ligas de alumínio e ferramentas de PCD concluíram que a texturização melhora o desempenho da usinagem reduzindo o atrito sem degradação da ferramenta de corte. Porém, seu trabalho envolveu um teste unidirecional, similar a uma plaina. Mas, se tratando de estudos envolvendo essa combinação para aplicações mais usuais, como torneamento ou fresamento, ainda há uma grande carência de referências. Até o presente momento, o único trabalho que até então utilizou da correlação alumínio e ferramentas de PCD texturizadas no processo de torneamento foi o trabalho de

Ghosh e Pacella (2020), todavia, as texturas estudadas são muito pequenas, até 5 vezes menores que na maioria das referências, utilizando profundidades de apenas 0,3  $\mu\text{m}$ , fornecendo, portanto, resultados restritos. Há uma clara correlação entre dimensões que favorecem a usinagem, porém, o ponto ótimo para tais parâmetros ainda não foi investigado. Até então se sabe, por exemplo, que maiores dimensões favorecem a redução do atrito no corte, mas em trabalhos tais como de Su et al. (2018), Hao et al. (2018) e Su et al. (2017), que estudaram texturização em ferramentas de PCD, as dimensões das texturas sempre ficaram limitadas até no máximo 60  $\mu\text{m}$ . Texturas acima de tal medida ainda não foram investigadas para tal tipo de ferramenta.

O presente trabalho indica possíveis parâmetros de texturas (direção, profundidade, largura, distanciamento e geometria), porém, estes parâmetros possuem forte dependência com a combinação de material e ferramenta usinados, e se tratando de Alumínio e PCD, não há estudos conclusivos sobre o assunto. Para isto, serão levantadas hipóteses baseadas em trabalhos já estudados, ora em mesmo material usinado, ora em ferramenta de mesmo material. Devido à alta ductilidade do alumínio, seu cavaco se deforma facilmente, preenchendo toda a textura e não havendo redução na área de contato entre o cavaco e a ferramenta (Sasi, Subbu e Palani, 2017). Por conseguinte, fica inviável a opção de se trabalhar com texturas rasas/estreitas na usinagem do alumínio. Assim, utilizando-se de texturas com dimensões maiores às comumente utilizadas na usinagem de metais menos dúcteis que o alumínio e, variando-se as condições e parâmetros dentro das faixas apropriadas, busca-se neste trabalho encontrar o melhor tipo de textura e expor sua eficiência em relação a uma ferramenta sem textura.

Esta pesquisa poderá definir a viabilidade da fabricação de ferramentas de cortes já texturizadas, que vão aumentar a eficiência dos processos de corte, economizando tempo, energia e dinheiro. Há também a abordagem de temas paralelos à texturização, como a junção de texturas com lubrificantes sólidos, o qual é pouco abordado em ferramentas tradicionais, mas vem se mostrando eficiente em alguns casos de ferramentas texturizadas (Arslan et al., 2016). Este tipo de lubrificação se desvia dos problemas ambientais e de saúde dos operários, acarretados pela lubrificação tradicional com fluidos.

Assim o presente trabalho busca mesclar conclusões que até então se encontram espalhadas na literatura a respeito de texturização. Aqui se busca variar os parâmetros de dimensões e geometrias das texturas, mas, ao invés de análises focadas apenas nos efeitos das texturas, será verificado se tais parâmetros estão também atrelados às propriedades dos materiais aqui estudados.

## 1.1 Objetivo Geral

Projetar diferentes tipos de texturas na forma de canais e os produzir em ferramentas de PCD (PolyCrystalline Diamond) através de usinagem a laser e realizar testes de torneamento em liga de alumínio 2011-T4 variando-se as condições de cortes tais como: lubrificação (seca ou com presença de lubrificantes sólido) e velocidade de corte. Os parâmetros das texturas a serem variados são direção, profundidade e largura dos canais. Por fim, testar ferramentas sem textura, nas mais variadas combinações dos parâmetros citados, para permitir comparações.

## 1.2 Objetivo Específico

Os objetivos específicos são:

- Projetar texturas com geometrias e dimensões variadas, buscando estabelecer uma investigação da significância da influência de cada parâmetro. Ainda verificar se o acabamento na produção das texturas do PCD é de boa qualidade e não danifica o material.
- Medir as componentes das forças de corte com o uso de um dinamômetro piezoelétrico em um torno CNC. Medir temperaturas na superfície das ferramentas com o uso de uma termocâmera. Medir rugosidade da superfície usinada com o uso de um rugosímetro. Caracterizar a morfologia dos cavacos por meio de análises de amostras coletadas nos ensaios.
- Avaliar efeitos das texturas em problemas típicos da usinagem de ligas de alumínio (como por exemplo, o comportamento dos cavacos, que na ausência de quebra-cavaco na ferramenta, geram-se cavacos contínuos devido à alta ductilidade da liga). Verificar se no caso da usinagem de materiais mais dúcteis, o efeito da textura pode divergir do esperado na literatura, no caso da usinagem de materiais menos dúcteis.
- Avaliar o efeito da textura com uso do lubrificante sólido  $\text{MoS}_2$  (Bissulfeto de molibdênio) e sua viabilidade.
- Comparar o efeito da textura com diferentes parâmetros dimensionais entre si e entre as ferramentas não texturizadas, definindo a melhor geometria dentre as produzidas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Usinagem e Torneamento

Um dos processos mais comuns na fabricação é o processo de usinagem. Este é definido por ser qualquer tipo de processo em que há remoção de material, o qual recebe o nome de cavaco (Ferraresi, 1970). Durante o processo, uma ferramenta é responsável por cisalhar o material usinado, por meio de movimentação relativa entre eles. A respeito da ferramenta de corte, existem dois tipos de geometria: definida e indefinida (Normung, 2003). Na usinagem com ferramenta de geometria definida, tem-se o torneamento (uma das operações mais conhecidas), a furação, o fresamento, etc. No torneamento, o modelo de corte mais comum possui um movimento rotacional da peça (cuja rotação e diâmetro definem a velocidade de corte), enquanto há o deslocamento da ferramenta de corte sobre a peça (avanço), havendo para tanto, uma penetração da ferramenta na peça (profundidade de corte). Este tipo de operação é capaz de produzir peças com geometria de sólidos de revolução.

Na indústria metal mecânica, o processo de torneamento é umas das operações mais utilizadas, por ser versátil (Klocke e Konig, 2007). Em se tratando de estudos e pesquisas de corte de metais com ferramentas texturizadas, o torneamento é também um dos processos mais usados devido à facilidade de aquisição de insumos, operação e instrumentação, representando em torno de 70% dos processos entre todas as últimas publicações no tema (Machado et al., 2021), e por representar uma parcela tão significativa, fabricantes de máquinas e ferramentas vêm investindo cada vez mais nesse processo, buscando otimizá-lo. O processo de torneamento mais estudado é o cilíndrico externo, embora existam outros tipos, como, por exemplo, o cilíndrico interno, cônico, de faceamento, perfilamento, sangramento e recartilhamento.

A eficiência do processo de corte depende de vários parâmetros. Dessa maneira, métodos capazes de reduzir forças de corte, temperatura de usinagem e desgaste das ferramentas permitem o aumento das velocidades trabalhadas, possibilitando reduzir custos e aumentar a produtividade. No tocante à ferramenta de corte, o endurecimento do material que é usado na sua fabricação, a produção de camadas de revestimento ou mesmo a texturização da superfície de saída são exemplos de técnicas capazes de aumentar a eficiência da ferramenta de corte (Kawasegi et al., 2009). Este último método, a texturização da superfície das ferramentas de corte, é uma área de estudo ainda pouco investigada, apesar de ser uma técnica já relativamente antiga, cujos primeiros estudos encontram-se no final da década de

60. Só na última década os trabalhos à respeito da texturização ganharam uma maior notoriedade, graças à facilitação ao acesso à meios mais eficientes de produção das texturas.

Diniz, Marcondes e Coppini (2006) afirmam que o corte de um metal acontece devido ao cisalhamento do material da peça ao longo do chamado plano de cisalhamento primário (Figura 2.1). O ângulo de cisalhamento, que é o ângulo entre a direção do corte e plano de cisalhamento, é inversamente proporcional à resistência ao corte, o que por sua vez, explica a produção de cavacos de espessura um pouco maior que a espessura do corte. Na área de contato entre o cavaco e a ferramenta (zona de cisalhamento secundária) há uma região de aderência próxima à aresta de corte, que é sucedida por outra região chamada de zona de deslizamento. É nesta interface que ocorrem os principais fenômenos ocorridos num processo de usinagem convencional e através das propriedades e parâmetros dos componentes envolvidos derivam-se os estudos de interesse no processo de corte.

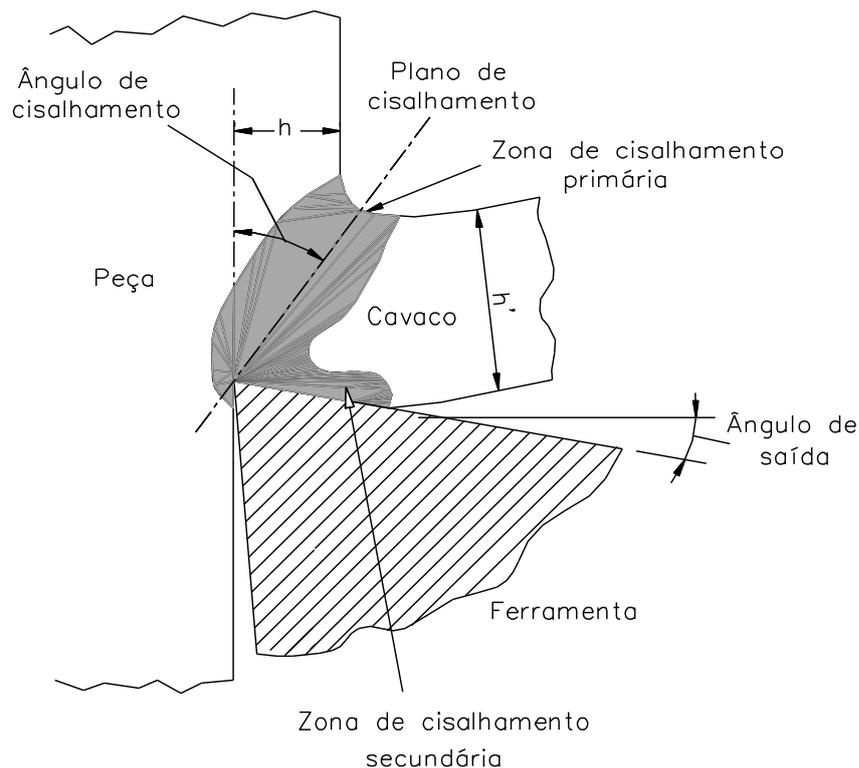


Figura 2.1 – Mecanismo da formação do cavaco. Fonte: Machado et al. (2015).

O processo de corte do material pode ser dividido nas etapas da formação do cavaco, como descrito por Machado et al. (2015). No primeiro momento ocorre o recalque, que se trata da penetração da ferramenta no material usinado, causando a deformação elástica do material e, posteriormente, a deformação plástica, e também a sua ruptura, e

consequentemente uma trinca surge na aresta principal da ferramenta, podendo se propagar ao longo do plano de cisalhamento primário, dependendo das características do material. Nessa etapa define-se a continuidade ou descontinuidade dos cavacos, posto que as condições de corte e principalmente as características do material vão governar a extensão da propagação da trinca gerada. Por fim, ocorre o deslizamento de lamelas formadas e a saída do cavaco, que é transportado sobre a região de aderência e de escorregamento, envolvendo forças e temperaturas elevadas, devido ao atrito que provocam o cisalhamento secundário.

Além dos efeitos relacionados à força, temperatura, desgaste de ferramenta, e integridade superficial da peça, entender a formação do cavaco também é importante para o seu controle. Cavacos com dimensões inadequadas podem causar acidentes ao operador, danos aos equipamentos, riscos na superfície da peça, parada de máquina e dificuldades no seu armazenamento e descarte. Cavacos em fita, longos e emaranhados (comumente obtidos na usinagem do alumínio) são os mais problemáticos.

## **2.2 A Liga de Alumínio 2011-T4**

O alumínio é um dos metais mais utilizados em produção de peças em todo o mundo, sendo o terceiro metal mais abundante na crosta terrestre. As propriedades que mais se destacam são a sua alta ductilidade, baixa densidade e o ponto de fusão relativamente baixo (659°C) em comparação a outros metais (Callister, 2002). O alumínio puro tem baixa resistência mecânica (aproximadamente 6 kgf/mm<sup>2</sup>), logo, sua aplicação envolve sempre a ligação com outros elementos.

Na usinagem, o alumínio é conhecido pela sua alta usinabilidade, e, portanto, pode ser usinado em altíssimas velocidades de corte (até 5 vezes maiores que os aços). Um dos principais problemas do uso de ligas de alumínio é a possibilidade de formação da aresta postiça de corte (Diniz, Marcondes e Coppini, 2006), mas, além disso, devido ao baixo módulo de elasticidade (1/3 do aço em média) e alta ductilidade, o alumínio gera cavacos contínuos, que promovem empastamento nas ferramentas de corte (Kelly e Cotterell, 2002). Dentre essas desvantagens citadas, a formação de cavacos contínuos é a mais grave, pois, ao emaranhar-se, pode comprometer a integridade superficial da peça, e em casos como operações de furação, pode até mesmo quebrar brocas (Batzer et al., 1988). Sobre o problema das APC no alumínio, Toropov, Ko e Kim (2005) recomendam realizar cortes com velocidade acima de 90 m/min para torneamento.

Ainda se tratando de torneamento de alumínio, Lane, Shi e Dow (2010) recomendam manter avanços entre 0,05 e 0,4 mm/rot. Polini et al. (2003) recomendam utilizar a maior profundidade de corte possível, dentro das limitações da rigidez do sistema e evitando deformar a peça torneada.

Uma grande vantagem da usinagem do alumínio é a possibilidade de se operar com velocidades de corte acima de 1000 m/min, o que favorece a produtividade, desde que a máquina atenda aos requisitos para se operar em rotações mais elevadas (potência, rigidez estrutural, transporte do cavaco, proteção para o operador, etc.).

Em relação à classificação das ligas de alumínio, a Aluminum Association Inc. define códigos numéricos para diferenciar as diversas ligas, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classes das ligas de Al.

<b>Classe</b>	<b>Elemento Majoritário na liga</b>
1XXX	-
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg
6XXX	Mg e Si
7XXX	Mg e Zn
8XXX	Outros

Fonte: ABNT NBR ISO 209 (2010).

Quando o primeiro algarismo é igual a 1, os dois últimos algarismos indicam a porcentagem de Al que excede a 99%. Nas classes de primeiro algarismo de 2 a 8, os dois últimos algarismos são somente uma diferenciação de ligas que estão nesse mesmo grupo. O segundo algarismo indica que a liga é derivada da sua respectiva liga base (quando o segundo algarismo é zero), ou seja, uma liga 2211 é derivada da liga 2011 (Alcan, 1993). As ligas das classes 2, 5, 6 e 7 são tratáveis termicamente, ao contrário das classes 1, 3 e 4. Na classe 8 há ligas que podem ou não ser tratadas termicamente.

As ligas de alumínio-cobre (2XXX) são geralmente complexas por causa da grande quantidade de aditivos usados para aumentar a resistência à corrosão ou estrutural, e controle dos grãos. Caracterizam-se por uma boa resistência mecânica e boa usinabilidade (originadas do endurecimento por precipitação que ocorre após a solubilização). Todavia, esta liga tem

uma elevada tendência à formação de microporosidade e possui baixa resistência à corrosão atmosférica. Nesta categoria, os materiais com melhor usinabilidade são as ligas 2011, 2017 e 2024, sendo a 2011 a mais popularmente utilizada por favorecer uma boa integridade superficial (Weingaertner e Schroeter, 1991).

A liga 2011 é mais simples na composição (alumínio + cobre + ferro + silício), exceto para a adição de chumbo e bismuto para melhorar a usinabilidade. A Tabela 2.2 descreve a composição química da liga 2011, na qual se pode observar a presença de Bi e Pb, elementos insolúveis e que se apresentam na matriz em forma de glóbulos, que favorecem a usinabilidade. As fases após solidificação e após tratamento térmico são Al-Cu e Fe (insolúvel) (às vezes sendo substituído por outros elementos insolúveis como Pb ou Bi) (Hatch, 1984). A fase líquida de chumbo-bismuto primeiro se separa em dendritos nos interstícios da matriz enquanto a solidificação está em andamento, então completa sua solidificação a uma temperatura muito baixa. O superaquecimento é um problema que requer atenção, pois as temperaturas do tratamento térmico da solução estão perto do equilíbrio solidus em ligas 2XXX. Rosetas aparecem como o primeiro estágio de superaquecimento. Um superaquecimento mais extenso causa o derretimento dos contornos do grão, particularmente em interseções triplas, e isso sinaliza o início da fusão da solução sólida (Hatch, 1984).

Tabela 2.2 – Composição de uma liga 2011.

<b>Elemento</b>	<b>Faixa de % (em peso)</b>
Al	91,3 - 94,6
Cu	5 - 6
Pb	0,2 - 0,6
Bi	0,2 - 0,6
Fe	0 - 0,7
Si	0 - 0,4
Zn	0 - 0,3
Outros	0 - 0,15

Fonte: Aluminum Association et al. (2000).

Há os seguintes tipos de ligas, no que se refere à classificação quanto ao tipo de tratamento imposto: Fabricada (F), Encruada (H), Recozida (O), Térmica (T) e Solubilizada (W), e sequenciando a letra, há um número que especifica o tratamento (Weingaertner e Schroter, 1991). Na liga 2011-T4, por exemplo, a parcela T4 desta nomenclatura indica um

tratamento térmico do tipo 4, que é em sua definição: solução tratada termicamente e envelhecida naturalmente.

A liga 2011-T4 é comumente aplicada na peças de eletrodomésticos, acabamentos automotivos e componentes de artilharia. Não é um bom material para ser trabalhado em soldagem, mas tem uma excelente usinabilidade. Sua dureza, devido ao tratamento térmico, é em torno de 100 HV, e suas resistências à fadiga, tração e cisalhamento são respectivamente 75, 310 e 190 MPa (Aluminum Association et al, (2000). A Tabela 2.3 mostra algumas propriedades do Alumínio 2011-T4.

Tabela 2.3 – Propriedade do Alumínio 2011-T4

Alongamento (%)	Limite de Resistência (MPa)	Dureza Vickers (HV)
18	350	95

Fonte: Aluminum Association et al. (2000).

### 2.3 Diamante Policristalino – PCD

Na usinagem convencional, a ferramenta de corte entra em contato com a peça, que por meio do movimento relativo, promove a remoção de material. Portanto, este é um componente que sofre desgaste, sendo de suma importância que ela tenha dureza superior ao material usinado.

Machado et al. (2015) ressalta de maneira mais específica as restrições necessárias nas propriedades das ferramentas de corte:

- Manter sua dureza acima da dureza do material mesmo em altas temperaturas;
- Altas resistências para desgaste abrasivo, compressão cisalhamento, choque térmico e impacto;
- Ser quimicamente inerte com os materiais envolvidos no processo de corte.

No caso de ferramentas feitas com materiais de dureza cima de 3000 HV, estes são denominadas ultraduros. Os exemplos mais comuns são variações de diamantes (sintéticos ou naturais) e nitreto cúbico de boro (mono e policristalino) (Machado et al., 2015). O diamante natural, por se tratar do material de maior dureza e resistência ao desgaste existente na natureza, foi escolhido como um material para a ferramenta de corte por centenas de anos. Porém, devido à sua fragilidade, baixa resistência (ver Tabela 2.4) ao impacto e também seu

alto custo, a aplicação de diamantes é limitada. Graças ao desenvolvimento de métodos de produção de diamantes sintéticos, tal material pode ser utilizado de forma mais ampla.

Os diamantes sintéticos, criados por volta de 1950, só se popularizaram no mercado de ferramentas de corte por volta de 1970. Normalmente, os diamantes sintéticos são produzidos em quantidades limitadas, na forma de placas (com espessura entre 0,5 e 1 mm) que revestem (total ou parcialmente) a superfície de saída de uma ferramenta, sendo esta última geralmente feita em metal duro. O diamante sintético é produzido ao sujeitar carbono na estrutura hexagonal compacta (HC) (na forma de grafite) em temperaturas e pressões muito elevadas (acima de 2000 °C e 7 Gpa, respectivamente), geralmente na presença de cobalto, o qual atua como catalizador. Tais condições implicam no rearranjo das posições dos átomos, em que então o carbono adquire uma estrutura do tipo cúbica de face centrada (CFC). Desta maneira é obtido o diamante monocristalino, e a partir deste, é produzido por metalurgia do pó, o diamante policristalino (PCD), cujos cristais são orientados de forma não sistemática. O PCD tem uma tenacidade bem maior quando comparado a um diamante monocristalino, que é proporcional ao tamanho do grão deste material, ao contrário do que em materiais como o metal duro (Clark e Sem, 1998).

Uma das limitações do PCD é a sua aplicação sob alta temperatura: quando a usinagem ultrapassa cerca de 780 °C (como na usinagem de materiais ferrosos) o PCD se carboniza e volta ao estado de grafite. Logo, alguns materiais que são mais apropriados para o uso dessas ferramentas são as ligas de alumínio, cobre puro e compósitos, pois possuem temperatura de usinagem bem abaixo deste limite, mesmo em altas velocidades de corte. As principais vantagens do PCD como ferramentas de corte são:

- Vida útil: são projetadas para funcionar por meses, o que significa menos tempo de inatividade, ao contrário de ferramentas de metal duro, que têm uma vida útil mais curta, às vezes durando apenas alguns dias ou semanas, dependendo dos níveis de produção. Isso torna as ferramentas de PCD uma ótima escolha para instalações de produção de alto rendimento;
- Desempenho de alta velocidade: as ferramentas de PCD podem operar até 10 vezes mais rápido do que as ferramentas de metal duro em sua eficiência e eficácia máximas. Isso significa que os trabalhos são finalizados mais rapidamente, reduzindo os prazos de entrega e aumentando a quantidade de trabalho que pode ser concluída;
- Acabamento de superfície da peça: as ferramentas de PCD podem fornecer um acabamento de superfície de alta qualidade sem a necessidade de uma operação secundária.

Isso acontece devido à capacidade do PCD poder manter sua aresta de corte e forma por um período mais elevado do que as ferramentas de metal duro e aço rápido (HSS).

A Tabela 2.4 mostra as principais características do PCD.

Tabela 2.4 – Características do PCD

Tamanho do grão ( $\mu\text{m}$ )	Condutividade Térmica (W/mk)	Resistência à Compressão (GPa)	Resistência à Ruptura Transversal (GPa)	Tenacidade à Fratura ( $\text{GPa m}^{1/2}$ )	Dureza Knoop (GPa)
10	560	7.6	0.96	7.31	50

Fonte: Su et al. (2017).

## 2.4 Texturas em Ferramentas de Corte

Em paralelo aos avanços tecnológicos, para se manterem competitivos no mercado, os fabricantes de ferramentas de corte estão buscando inovar por meio de pesquisas e desenvolvimentos que aprimorem seus produtos. Desta forma, novas tecnologias despontam, trazendo consigo novos desafios para pesquisadores na usinagem. O foco destas tecnologias consiste na busca por otimizar o tribossistema que envolve o contato na interface cavaco ferramenta, reduzindo atrito, geração de calor, desgaste, consumo de energia, melhorando a rugosidade final das peças, etc.

Atualmente, cada vez mais pesquisas surgem defendendo a ideia de que é possível alterar o contato entre o cavaco e a ferramenta por meio da modificação da superfície da ferramenta de corte com texturizações, especificamente na região onde há o contato com o material, sendo então uma textura em pequena escala e de dimensões precisas e geometrias bem definidas.

Texturização de uma superfície é a produção de padrões topográficos com capacidade de alterar a interação desta superfície quando comparada a uma superfície sem tais padrões, de tal forma que a presença dela seja capaz de beneficiar o processo o qual a superfície participa. Quando presente na superfície de ferramentas de corte, as texturas têm a capacidade de alterar o fenômeno tribológico do contato do material da peça/cavaco e da ferramenta, alterando o comportamento das forças ali presentes (Lima, 2005).

Com o surgimento e a popularização das técnicas envolvendo a engenharia de superfícies, o estudo da texturização aplicada a ferramentas de corte na usinagem recebeu destaque. As mais variadas técnicas de produção de textura nas ferramentas são muito

similares às técnicas aplicadas, por exemplo, na texturização de próteses, rolamentos e cilindros de pistão (Da Silva e Costa, 2017). Tais técnicas incluem uso de FIB, EDM e principalmente laser. Mas, diferente desses exemplos de sistemas mecânicos, o tribossistema na usinagem está sujeito a pressões de contato em escalas muito mais elevadas, tornando a texturização de ferramentas de corte algo de elevada complexidade.

Estas altas pressões de contato na interface cavaco-ferramenta ocorrem na usinagem, porque o corte da peça só ocorre quando a pressão é alta o suficiente para permitir o cisalhamento do material usinado, gerando o cavaco. Tais pressões inviabilizam o uso de algumas técnicas tradicionais de lubrificação, desse modo, a texturização passou a se tornar uma alternativa para modificar o contato cavaco-ferramenta com objetivo de otimizar o corte da peça.

#### 2.4.1 Geometria das Texturas

Desde os primeiros estudos de texturização em ferramentas de cortes, os pesquisadores buscam experimentar diferentes geometrias de texturas para estudar seus efeitos. Há autores que buscam criar padrões como, por exemplo, nos trabalhos de Mishra, Ghosh e Aravindan (2019), Arulkirubakaran et al. (2019) e Orra e Choudhury (2018), ou ainda autores que buscam mesclar variadas geometrias como nos trabalhos de Pan et al. (2018), Kang et al. (2018-A), Gajrani, Sankar e Dixit (2018-A) e Wei et al. (2017). Todavia, as geometrias mais predominantes são canais (*grooves*) lineares, representando 39% das texturas estudadas nos últimos 5 anos e *dimples*, representando 25% (Machado et al., 2021). A Figura 2.2 ilustra estas triviais geometrias.

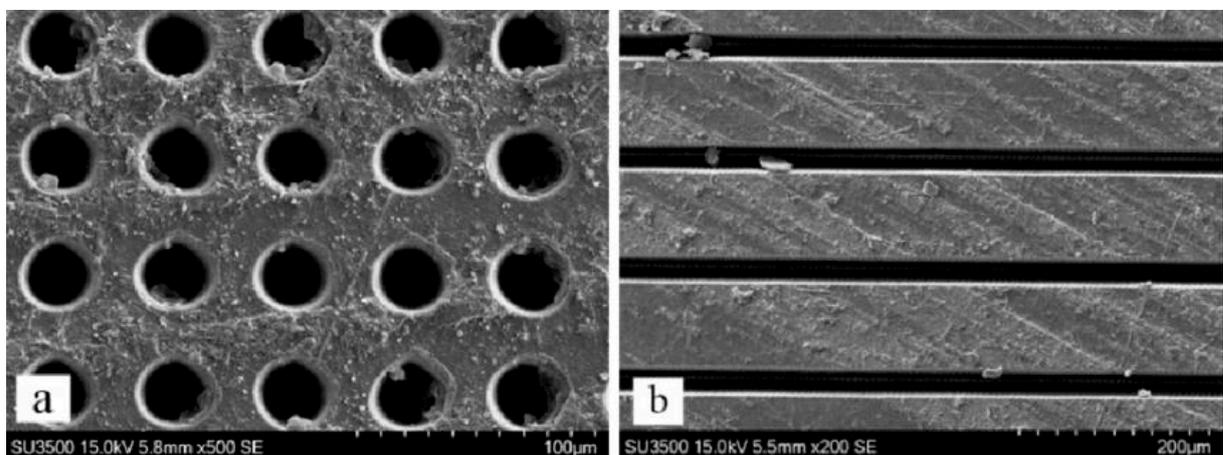


Figura 2.2 – a) Textura *dimple* b) Textura canais. Fonte: Zhang et al. (2019).

As texturas do tipo *dimple* podem ter diferentes formas de furos, como no trabalho de Xing et al. (2018-A) que produziu furos circulares, quadrados e triangulares (Figura 2.3). Mas, a esmagadora maioria dos *dimples* estudados são circulares, variando apenas dimensões (como profundidade, raio, etc.).

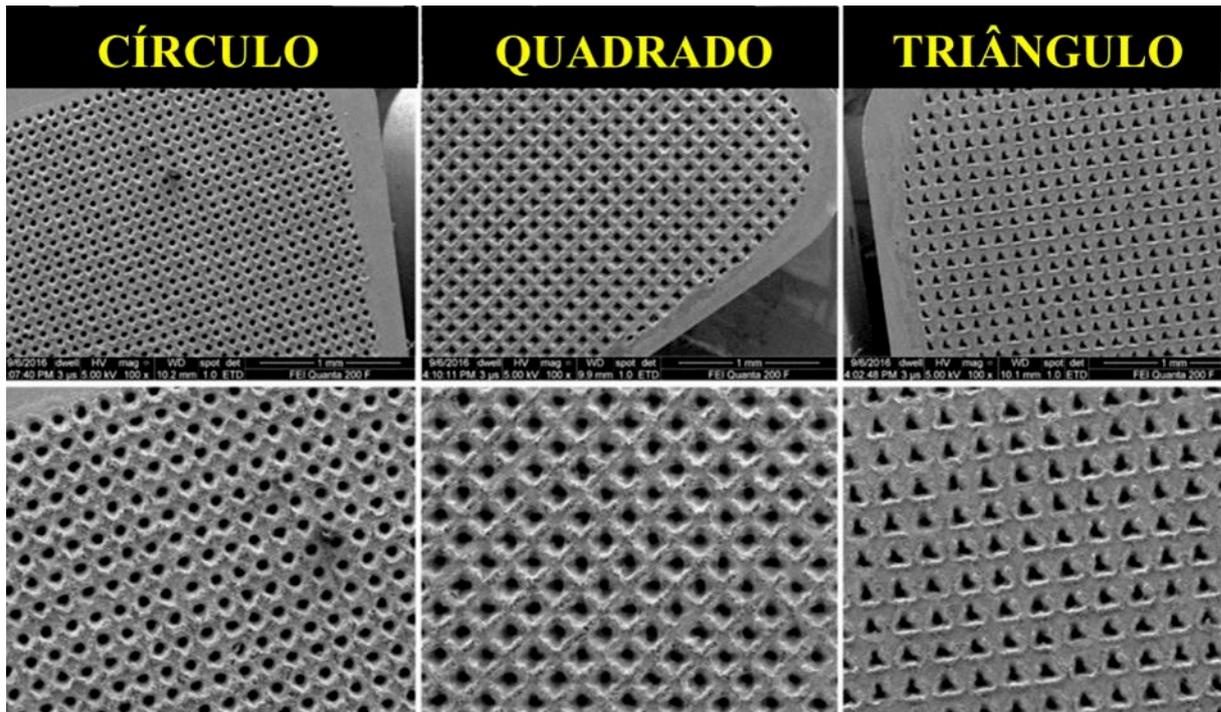


Figura 2.3 – Diferentes tipos de texturas *dimples*. Fonte: adaptado de Xing et al. (2018-A).

As texturas do tipo canais (*grooves*) são sulcos, que variam sua orientação em relação à direção da aresta de corte (às vezes referenciados pela direção do fluxo de cavacos), sendo, geralmente, produzidos em paralelo ou perpendicular a esta direção. Alguns trabalhos ainda buscam posicioná-los com alguma inclinação a tal direção, ou mesmo não produzir *grooves* lineares, mas em zig-zag ou outras variações, exemplificadas na Figura 2.4.

Os efeitos que as diferentes geometrias geram na usinagem não são muito claros quando considerado apenas a forma da textura. É preciso correlacionar também às dimensões da textura, posição na ferramenta de corte, lubrificação e etc.

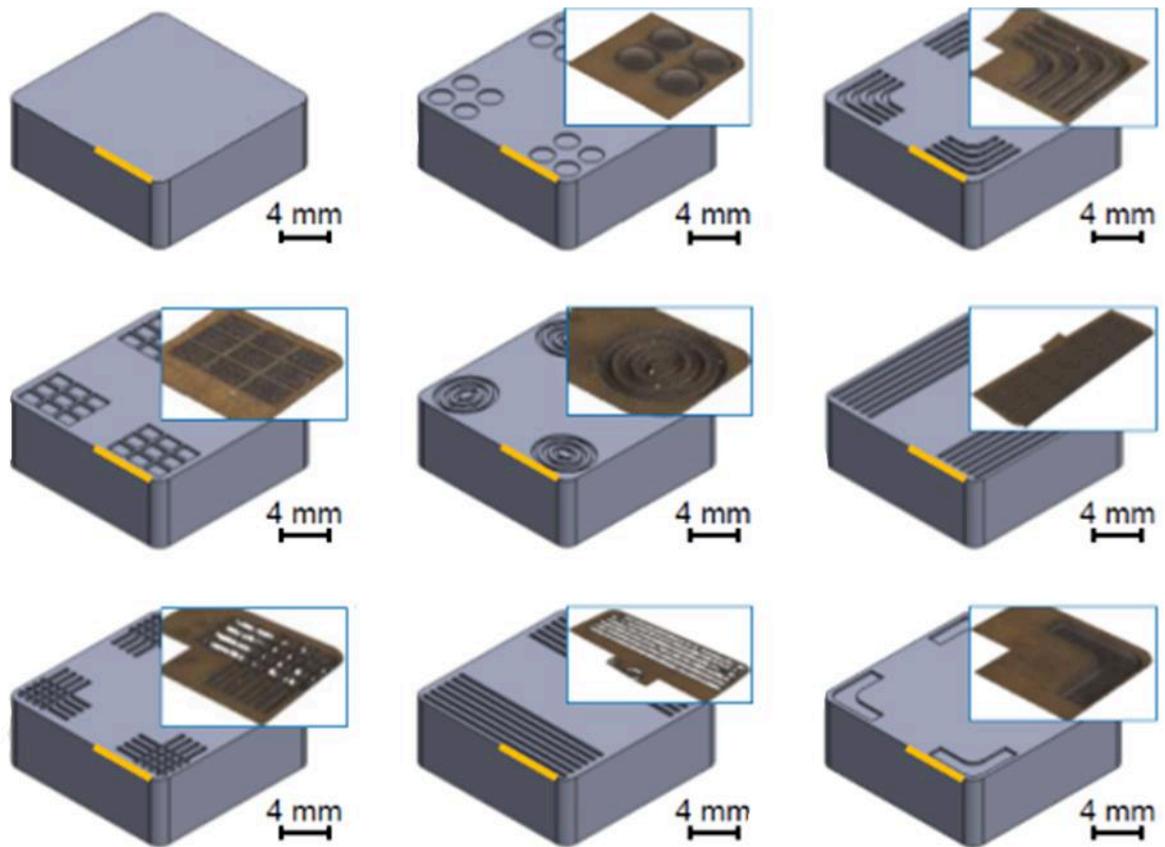


Figura 2.4 – Comparação de diferentes texturas na superfície de saída em ferramentas de corte (modelos em CAD e imagens ópticas 3D reais). Fonte: adaptado de Wu et al. (2017).

#### 2.4.2 Dimensões das Texturas e Seus Efeitos na Usinagem

Em se tratando de texturas em ferramentas de corte, os parâmetros dimensionais (profundidade, largura, distanciamento, geometria/forma e direção) possuem grande influência e cada um deles altera o resultado de forma notável. Estes parâmetros ainda podem ter resultados essencialmente opostos dependendo da combinação, do tipo de ferramenta e de material usinados, de forma que os resultados acabam não abrangendo uma gama ampla de situações, exigindo então experimentação para casos específicos.

Em se tratando de formação de cavaco, Feng et al. (2019) constataram que em texturas do tipo *groove* (canais/riscos/sulcos) a largura, junto à velocidade de corte, são os parâmetros mais influentes, sendo que com uma menor largura no *groove* e uma maior velocidade de corte, há pouca influência na formação do cavaco. Em relação às forças de usinagem, segundo os estudos de Mishra, Ghosh e Aravindan (2018-A), o parâmetro mais influente é a densidade de texturas presentes na ferramenta. Aumentar a largura e espaçamento entre os *grooves* reduz o contato ferramenta-cavaco, mas em contrapartida, aumenta o fluxo e a aderência dos

cavacos nas texturas e ainda, aumentar a profundidade dos *grooves* é pouco eficiente (Patel, Shah e Ozel, 2019). Tal conclusão está em consonância com Mishra, Ghosh e Aravindan (2018-A), que concluíram que a profundidade não tem nenhum efeito, quando o corte é feito à seco. Segundo Patel et al. (2020), os parâmetros de dimensão e posição de texturas *grooves* não mostraram nenhuma tendência em gerar efeitos na redução das forças de usinagem e sabe-se ainda que, profundidade em excesso pode aumentar as forças. Mas, para efeitos de temperatura e desgaste, profundidade e distância da aresta de corte mostraram uma tendência: quanto maiores, maiores a temperatura e o desgaste. Fang e Obikawa (2017) concluíram que se tratando de temperatura, em texturas *dimples*, as dimensões de textura são ainda mais influentes do que texturas *groove*.

Em texturas *dimples*, o parâmetro mais influente é o seu respectivo diâmetro, como estudado por Durairaj et al. (2018). E indo além e descrevendo mais sobre os outros parâmetros em texturas *dimples*, a ordem de influência descrita por Yang, Yu e He (2019-A) (que focou no efeito sobre a rugosidade) é a seguinte: “diâmetro > distanciamento > profundidade > distância da aresta de corte”. Segundo Yang et al. (2020), focando no efeito sobre a força, a ordem é “diâmetro > distância da aresta de corte > profundidade > distanciamento” e para foco em desgaste a ordem é “distância da aresta de corte > distanciamento > profundidade > diâmetro”. Ainda sobre estes parâmetros citados de dimensões em texturas *dimples*, Vignesh et al. (2020) definiram valores específicos para otimizar os efeitos das texturas. Quando a velocidade de corte é muito alta, as texturas *dimples* só terão efeito se estiverem em uma alta concentração, como pode como demonstrado no estudo de Stoeterau, Janssen e Mallmann (2017).

Valores específicos para definir os melhores parâmetros para fabricar texturas podem ser vistos em diversos trabalhos, como, por exemplo, no artigo dos autores Sharma e Panday (2017) e Fang e Obikawa (2017) para *dimples* e Liu et al. (2018-A) e Wu et al. (2017) para *grooves*, sendo que, este último, concluiu que a proporção entre largura e profundidade ótima para *groove* está por volta da dimensão da largura sendo 43 % da dimensão da profundidade, para se minimizar as forças de corte e facilitar a formação de cavaco.

O parâmetro da profundidade recebe destaque então em cortes com lubrificantes. Fang e Obikawa (2017) concluíram que texturas *dimples* geram redemoinho incompleto e correntes parasitas em *dimples* de 10 e 20  $\mu\text{m}$  de profundidade, respectivamente. A mudança da profundidade do *dimple* alterou a distribuição da energia cinética turbulenta do fluxo principal, bem como o padrão do fluxo na folga do flanco. O trabalho de Pratap e Patra (2020), que trabalharam com MQL, correlaciona as dimensões das texturas com o tamanho

das gotas do lubrificante, destacando o efeito da molhabilidade do fluido na textura. Tal efeito de molhabilidade de lubrificantes em ferramentas com texturas recebe mais destaque no estudo de Hao et al. (2018), que reafirmam a amplificação do efeito das texturas sob esse tipo de lubrificação, frisando texturas *grooves* com profundidade de 10  $\mu\text{m}$ .

### ***2.4.3 Características Tribológicas Resultante das Texturas***

Um dos efeitos positivos das texturas é a capacidade de reter resíduos de desgaste (abrasão, adesão, etc.). No caso de *grooves*, esta retenção se destaca em *grooves* perpendiculares ao fluxo de cavaco (Su et al., 2018). No artigo de Sivaiah e Bodicherla (2020), além de *grooves* paralelos e perpendiculares ao fluxo de cavaco, eles também estudaram com inclinação de 45° e concluíram que nessa última são gerados menos detritos de metal na superfície usinada e menos APC na ferramenta. Porém, se o *groove* não é linear, e sim padronizado, as texturas evitam o depósito de detritos dentro da cavidade, como visto nos artigos dos autores Kim et al. (2016) e Zhang et al. (2020), e que ainda concluíram que em certos casos isso pode promover uma redução do atrito. Sobre texturas *dimples*, o aprisionamento de resíduos está ligado diretamente ao tamanho das texturas, e esse efeito foi observado em artigos como Sugihara e Enomoto (2017-A), Song et al. (2017) e Niketh e Samuel (2017). Para textura nano, obviamente não é significativo o aprisionamento de resíduos de desgaste.

Para textura *grooves* lineares, que são 40% de todas as texturas estudadas nos últimos 5 anos (Machado et al., 2021), é importante citar sua direção, que geralmente é paralela ou perpendicular à aresta de corte (em alguns poucos artigos a referência da direção é em relação ao fluxo de cavacos). Tribologicamente, a melhor direção é perpendicular ao fluxo de cavacos. Tal afirmação é feita por Dhage, Jayal e Sarkar (2019) que concluíram que caso a textura esteja paralela ao fluxo, o cavaco entope a textura e gera contato, e caso seja perpendicular ao fluxo, a área de contato é menor. Chen et al. (2019), Arulkirubakaran et al. (2019), Kumar e Patel (2018) e Grguraš e Pusavec (2019) também concordam que há melhores resultados com o posicionamento da textura perpendicular ao fluxo, pois neste caso, apesar de haver alteração na curvatura do cavaco, se observa uma redução da área de contato, menor adesão e maior aprisionamento de resíduos. Porém, os autores Su et al. (2018) concluíram que *grooves* na direção do fluxo do cavaco retardam o crescimento da área de adesão. Para ângulos variados, há o estudo de Vasumathy e Meena (2017), concluiu que os *grooves* nas direções tradicionais paralelas e perpendiculares à aresta de corte são os mais

eficientes, enquanto os *grooves* numa direção que forma um ângulo agudo com a aresta de corte principal têm uma eficiência menor, e no caso desse ângulo ser obtuso, o efeito da textura é de piorar as forças de corte. Em se tratando de corte de acabamento, a orientação dos *grooves* lineares não apresentou relevância (Kang et al., 2018-A).

Um caso em que o aprisionamento de resíduos tem impacto amplificado é na usinagem por furação. Niketh e Samuel (2018) realizaram em brocas inúmeras texturas do tipo *dimple* (diâmetro de 90  $\mu\text{m}$  e profundidade 60  $\mu\text{m}$ ) e também *grooves* (largura 50  $\mu\text{m}$  e profundidade 40  $\mu\text{m}$ ), e seus resultados experimentais mostraram uma redução considerável na força de avanço e no torque. O uso de brocas texturizadas reduziu o atrito de deslizamento entre a interface cavaco-ferramenta. Através de um mapeamento na superfície da broca constatou-se que houve uma redução de até 44% do efeito de adesão na ferramenta em comparação com uma broca não texturizada. A Figura 2.5 apresenta como a texturização em brocas auxilia no corte. Artigos como de Niketh e Samuel (2017) ainda observaram que tal efeito pode reduzir até 12% dos esforços envolvidos na furação.

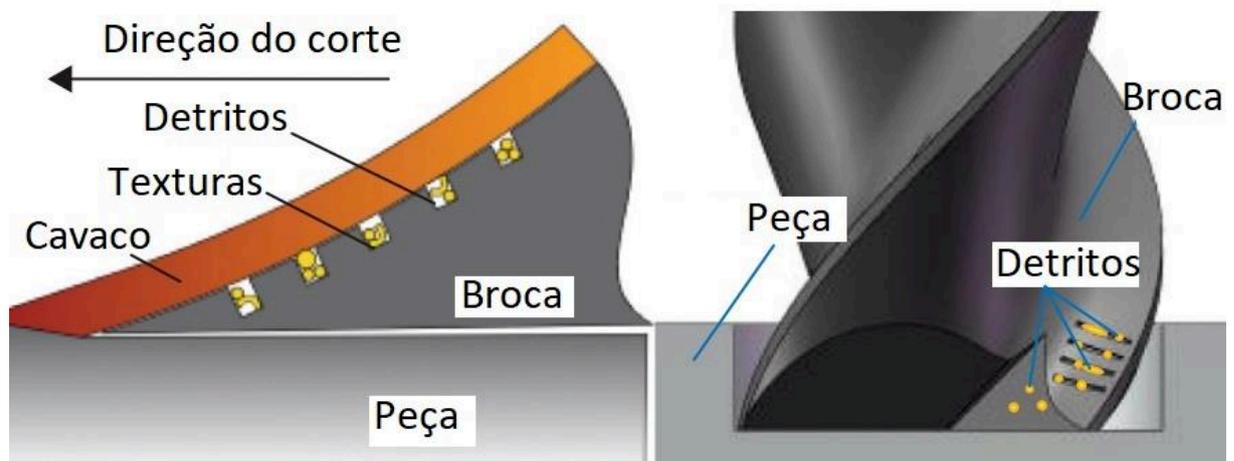


Figura 2.5 – Esquematização da atuação das texturas em brocas. Fonte: adaptado de Zhang et al. (2019).

No caso dos detritos aprisionados em texturas *dimples*, ainda não foi estudado um meio para a remoção dos mesmos. Em se tratando de texturas *grooves*, a viabilidade da remoção dos detritos é proporcional à dimensão dos *grooves*. Há também, a influência do material dos detritos, em que partículas pequenas e sólidas podem ser removidas com técnicas baseadas em vibração, enquanto partículas maiores e mais dúcteis necessitam de processos químicos, ou ainda jateamento ou processos manuais. A remoção dos detritos oriundos da

usinagem podem ter, em certos casos, as mesmas técnicas de remoção de detritos oriundos do processo de fabricação das texturas na ferramenta de corte.

#### 2.4.4 Redução do Efeito de Adesão na Ferramenta Texturizada

Uma das vantagens mais citadas sobre o uso de ferramentas texturizadas consiste na redução do efeito de adesão, que é ostensivo em quase todos os estudos sobre texturização. Um terço dos artigos estudados nos últimos 5 anos concluíram de forma expressiva tal benefício (Machado et al., 2021). Houve estudos como em Zhou et al. (2019), Lian, Chen e Mu (2019) e Ghosh e Pacella (2020) que evidenciaram que texturizar a ferramenta pode reduzir a adesão em até 60%. Inclusive texturas em nano escala também podem proporcionar tal benefício, como é descrito por Liu et al. (2018-B) e Zhang et al. (2017). Somente um trabalho (Alagan et al., 2019) concluiu que a textura não teve significância no efeito de adesão, sendo em apenas um único caso específico dentre várias modalidades de texturas feitas pelo autor. Outros dois trabalhos (Liu et al., 2019 e Singh et al., 2020) concluíram que a textura só não influenciou o efeito de adesão em seus estudos, para experimentos em baixas velocidades.

Lian, Chen e Mu (2019) constataram que texturas *grooves* podem conter o material aderido na ferramenta, enquanto as ferramentas lisas tinham material aderido em até 200  $\mu\text{m}$ , a partir da aresta de corte, nas ferramentas texturizadas tal medida não passou de 88  $\mu\text{m}$ . Na Figura 2.6 é exemplificado tal efeito.

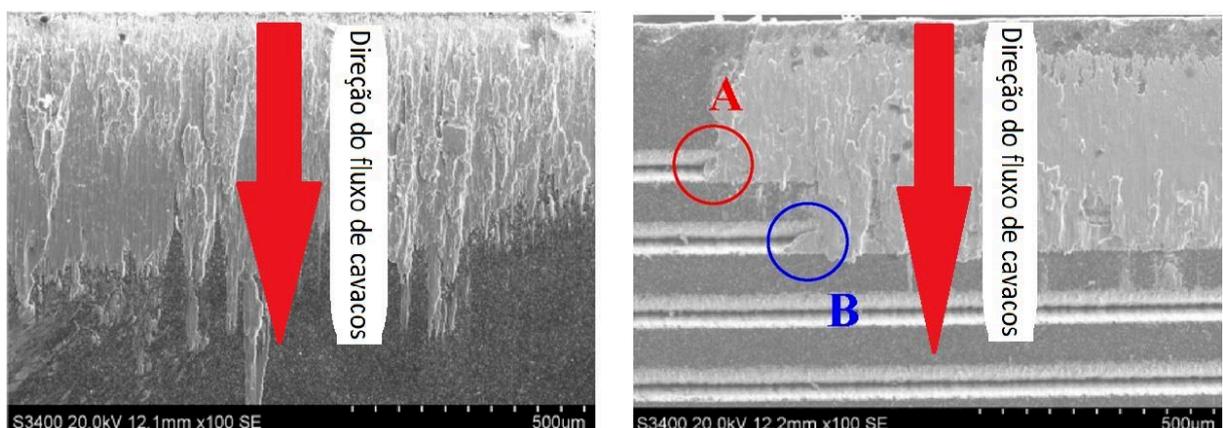


Figura 2.6 – À esquerda, imagem de uma ferramenta sem textura, e à direita uma exemplificação de como texturas perpendiculares ao fluxo de cavacos podem ajudar a evitar o efeito de adesão. Fonte: adaptado de Su et al. (2018).

Alguns autores, como Sawant, Jain e Palani (2018), concluíram que dentre as geometrias de texturas, as *dimples* são as mais eficientes para reduzir adesão. E, indo além, dentre os possíveis parâmetros de formas de texturas *dimples*, Xing et al. (2016) e Ahmed et al. (2020) notaram que o *dimple* quadrado reduz ainda mais o efeito de adesão. Já dentre os possíveis parâmetros dimensionais de textura *dimple*, o diâmetro é o mais influente, segundo Durairaj et al. (2018). O trabalho de Niketh e Samuel (2018), que trabalharam com texturas *dimples*, mostra claramente o efeito de aprisionamento de partículas atuando como redutor de adesão (Figura 2.7). Porém, fica evidente que as partículas vão saturar dentro da textura, comprometendo sua atuação. Cada superfície completamente selada será responsável por uma área em que ocorrerá contato entre o cavaco e esta superfície de mesmo material. Com base nas dimensões das texturas, é possível estimar o tempo de atuação ao longo do processo de corte.

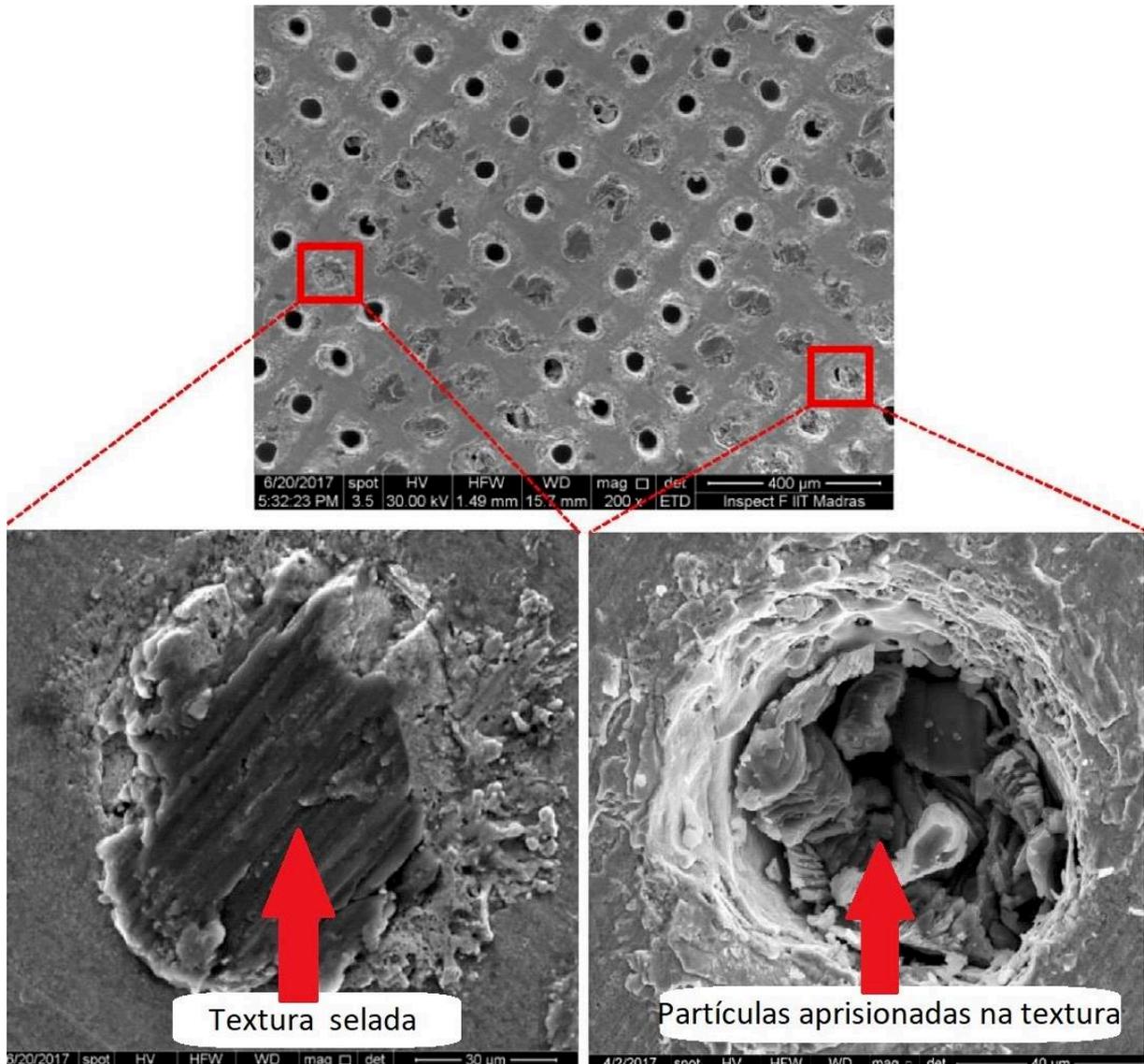


Figura 2.7 – Atuação de texturas *dimples* na redução da adesão até a saturação de cada textura. Fonte: adaptado de Niketh e Samuel (2018).

Em geral, os autores descrevem que a razão das texturas reduzirem o efeito de adesão está na redução da área de contato entre ferramenta e a peça usinada. O efeito anti-adesão em ferramentas texturizadas é especificamente estudado no artigo de Su et al. (2018). Outros benefícios das texturas que reduzem de forma direta o efeito da adesão da ferramenta é o melhor acesso do lubrificante (Ge et al., 2019), como visto por vários autores: Arulkirubakaran et al. (2019), Pang, Liu e Liu (2019), Dinesh, Senthilkumar e Asokan (2017) e Pratap e Patra (2020). Outros fenômenos estudados que justificam a redução da adesão em ferramentas texturizadas é o intertravamento mecânico, estudados 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*

Uma ação capaz de reduzir os esforços necessários para o cisalhamento do material da peça garantindo uma melhoria no processo de corte é o uso de lubrificantes. Em se tratando de fluidos lubrificantes, quando aplicados na forma de jorro, são capazes de retirar parte do calor gerado nas operações de usinagem. Logo, lubrificantes, além da função de lubrificar, ainda atuam como refrigerantes no processo (Sukaylo et al., 2004). Temperaturas excessivamente elevadas podem acelerar alguns mecanismos de desgaste como difusão, adesão, dissolução, etc., comprometendo a vida da ferramenta de corte, portanto, reduções na temperatura (mesmo que pequenas) podem aumentar a vida da ferramenta (Ferraresi, 1970).

Entretanto, a utilização de fluidos de corte tem sido contestada amplamente devido a problemas relacionados à saúde dos operados e aos danos ambientais. O uso de fluidos lubrificantes não é uma prática sustentável, tendo em conta que possuem características negativas em todos os aspectos do “tripé ambiental” (TBL) (King et al., 2001):

- Socialmente: são danosos à saúde humana, comprometendo operadores.
- Ambientalmente: são tóxicos ao meio ambiente, e seu descarte necessita de cuidados especiais.
- Econômico: para tratar os impactos na segurança dos operários e no descarte do fluido, há mais uma despesa para a indústria, assim como a descontaminação do cavaco para sua respectiva reciclagem. Ainda segundo King et al. (2001), há estimativas que os fluídos podem corresponder a até 20% dos custos da usinagem.

Devido aos problemas causados, empresas buscam reduzir ou mesmo eliminar o uso de fluidos lubrificantes convencionais, explorando alternativas capazes de substituí-los. Surgiu-se então estudos envolvendo técnicas com fluidos de composição química não prejudicial, aplicação em MQL, uso de lubrificantes sólidos, ou ainda, técnicas especiais como refrigeração interna da ferramenta de corte (Rao e Krishna, 2008).

Dessa maneira, o corte à seco tem sido apontando como uma grande tendência para o futuro dos processos de usinagem, pois, excluindo o uso de fluidos de cortes, há redução nos custos de produção e de danos ambientais. Para Diniz e De Oliveira (2004), as vantagens do corte a seco incluem: menor poluição da atmosfera e das redes pluviais; nenhum resíduo de óleos nos cavacos, que se refletirá nos custos de eliminação e limpeza; nenhum risco para a saúde. Devido aos avanços tecnológicos nas ferramentas de corte, tal conquista está cada vez mais próxima de sua consolidação. Porém, na usinagem a seco há maior coeficiente de atrito e aderência entre a ferramenta e a peça, resultando em maior desgaste da ferramenta e,

consequentemente, a redução na vida útil da ferramenta (Sreejith e Ngoi, 2000 e Reddy, Kapoor e Devor, 2000). Enquanto ainda não há um alinhamento definitivo entre as demandas e as eficiências das técnicas, alternativas que pelo menos eliminem o uso de fluidos de corte já estão indicando resultados satisfatórios.

Uma grande alternativa é o uso de lubrificantes sólidos, sendo os mais comumente aplicados o grafite, o bissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ), o fluoreto de cálcio ( $\text{CaF}_2$ ) e o ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) (Cotton e Wilkinson, 1988). Eles podem ser aplicados na superfície antes do processo de corte ou ainda na forma de revestimento na ferramenta (Klocke, 2011). Sua atuação consiste na formação de microestruturas lamelares com baixa força de adesão entre eles, assim, estas lamelas possuem baixa resistência entre si e cisalham facilmente, atuando como filme lubrificante eficiente, com um coeficiente de atrito relativamente baixo.

Sobre as desvantagens citadas anteriormente para lubrificantes fluidos, os sólidos têm vantagens em todos os tópicos (ambiental, social e econômico), porém possuem a desvantagem de baixa durabilidade e baixo efeito de redução de temperatura. Para contornar o problema da baixa durabilidade do lubrificante sólido na ferramenta de corte, o uso de ferramentas texturizadas é suplementar à sua utilização (Ze et al., 2012).

Dessa maneira, as texturas nas ferramentas de corte, juntamente com sua capacidade de armazenar resíduos, podem armazenar lubrificantes sólidos. O mecanismo, descrito por Feng et al. (2017), funciona da seguinte maneira: a textura é preenchida primeiramente pelo lubrificante sólido, e durante o processo, os resíduos dos cavacos que são mais pesados irão se aprisionarem dentro das texturas, então o lubrificante sólido irá transbordar e formar uma camada de filme lubrificante na superfície texturizada. Mas mesmo em escala nano (que não possui esta relação de transbordamento de lubrificante com a entrada de resíduos), as texturas também são capazes de aprimorar os efeitos de lubrificantes sólidos, como visto nos artigos Lian et al. (2018) e Zhang et al. (2017), pois elas atuam como uma barreira contra o deslizamento do lubrificante. Para texturas do tipo *grooves*, as lineares são as mais eficientes para se usar com lubrificantes sólidos, ao invés de *grooves* padronizados (Orra e Choudhury, 2018). Nas *dimples*, esta eficiência está no efeito de formação de um filme lubrificante de forma descontínua, que favorece a redução de temperatura (Song et al., 2017). Entretanto, segundo Sun et al. (2016), a melhor maneira de trabalhar com lubrificantes sólidos é com geometrias híbridas (*grooves* e *dimples*). Segundo Gajrani, Kishor e Sankar (2018-A), que tornaram aço AISI 1040, foi constatado que, quando há presença de  $\text{MoS}_2$  na textura, o valor médio da rugosidade reduziu de 2 a 11 %, e o valor médio da temperatura reduziu de 4 a 20 %, quando comparado à uma textura sem tal preenchimento.

#### ***2.4.6 Efeito de Corte Derivativo Ocasionado por Texturas***

O corte derivativo é um fenômeno no qual o cavaco já formado é cisalhado dentro de uma textura (Figura 2.8). Tal fenômeno teve seus efeitos observados em vários trabalhos, podendo-se citar como exemplo: Lian, Chen e Mu (2019), Mishra, Ghosh e Aravindan (2018-B), Liu et al. (2018 B) e Liu et al. (2017). Mas foram os trabalhos de Duan et al. (2018), Duan et al. (2017) e Dinesh, Senthilkumar e Asokan (2017) que mais se aprofundaram no estudo de tal fenômenos. O corte derivativo tem a capacidade de causar pequenas bifurcações no fluxo de cavaco ao remover material em sua parte inferior, aumentando a quantidade de cavaco que terá atrito com a ferramenta, o que caracteriza uma maior geração de calor na região (Duan et al., 2019). Tal efeito contribui para o aumento nas forças de corte e um desgaste mais severo na ferramenta de corte, piorando o desempenho de uma ferramenta texturizada. Tal fenômeno é típico de texturas *grooves* perpendiculares ao fluxo de cavacos, em que a aresta da textura atua como uma sub-aresta de corte, porém, outras geometrias de texturas também podem gerar tal efeito.

Este fenômeno também está correlacionado com danos gerados na ferramenta de corte, como trincas na região texturizada. Artigos como de Lian, Chen e Mu (2019) evidenciam que em se tratando de torneamento com texturas rasas (profundidade de 10  $\mu\text{m}$ ), este fenômeno só ocorre em altas velocidades. Estudos como o de Liu et al. (2018-A), constataram que o desgaste do revestimento da ferramenta pode causar um degrau em escala nanométrica próximo das texturas, e a partir daí conceber o fenômeno de corte derivativo. Porém, também houve casos, como no estudo de Liu et al. (2017), que ao tornear alumina verde, constatou-se que o corte derivativo reduz o contato do cavaco com a superfície de flanco da ferramenta, reduzindo o desgaste nessa região.

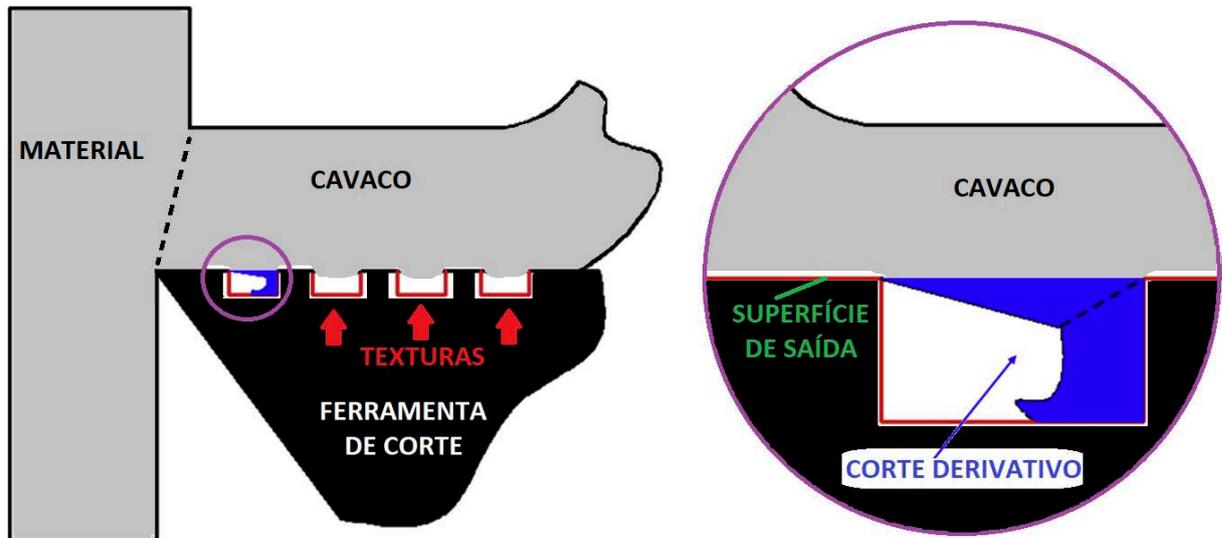


Figura 2.8 – Esquemática do corte derivativo. Fonte: adaptado de Duan et al. (2019).

#### 2.4.7 Efeito na Força de Usinagem

As forças de corte na usinagem são um dos principais indicadores e se correlacionam com todas as variáveis presentes nos processos envolvidos. Comparando-se os vários processos de fabricação, na usinagem as forças são relativamente pequenas (Trent e Wright, 2000). Uma das razões para isso é a pequena quantidade de material que é trabalhada por ciclo, diferente de um processo de extrusão, laminação ou forjamento, por exemplo. Todavia, como as áreas de contato entre peça/cavaco e ferramenta são muito pequenas, as tensões na usinagem tornam-se altíssimas.

A texturização das ferramentas vem se mostrando capaz de reduzir as forças de corte, como visto em trabalhos na literatura. Dentre esses trabalhos, alguns se destacam, como Mishra, Ghosh e Aravindan (2019) que utilizaram uma ferramenta de carboneto de tungstênio revestida com TiAlN (aplicadas pelo método de deposição física de vapor - PVD) com texturas em *chevron*, para tornear uma peça da liga Ti6Al4V. Os parâmetros de corte foram fixados com  $v_c$  entre 100-160 m/min,  $f$  entre 0,1-0,2 mm/rev e  $a_p$  em 0,5 mm. A ferramenta texturizada revestida com TiAlN resultou na redução das forças de corte, do coeficiente de atrito aparente, do comprimento de contato e no menor raio de curvatura do cavaco em comparação com outras ferramentas testadas. A força de corte foi reduzida em 17–19,5% na melhor condição (ferramenta texturização e revestida). O aumento no avanço aumentou o comprimento do contato e, portanto, a eficácia das ferramentas texturizadas melhora com maior avanço.

No trabalho de Arulkirubakaran et al. (2019) foi realizada uma série de variações para analisar os efeitos das texturas: foram feitas texturas na superfície de saída de ferramentas de carboneto de tungstênio, sendo elas sulcos circulares e também lineares (perpendicular e paralelo à aresta de corte). Foi então feito um torneamento do compósito Al-Cu / TiB<sub>2</sub>, à seco e com fluido (20% MoS<sub>2</sub> e 80% óleo SAE), com  $v_c$  entre 60-120 m/min, avanço em 0,1 mm/rev e  $a_p$  em 0,5 mm. As texturas reduziram significativamente as forças de corte em ambas as condições (secas e lubrificadas). A força de corte foi reduzida em até 30% com textura linear perpendicular à aresta de corte devido a menor adesão do material de trabalho na ferramenta, ausência de formação de arestas e melhor lubrificação efeito nas interfaces do cavaco na ferramenta.

Xing et al. (2018-A) estudaram os efeitos de nanotexturas, com e sem revestimento. As nanotexturas foram feitas por laser femtossegundos, na superfície de saída de ferramentas cerâmicas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC. Após a produção das nanotexturas, algumas ferramentas receberam revestimento de WS<sub>2</sub>/Zr aplicadas pelo método PVD. Para testar as ferramentas foi realizado um torneamento a seco em aço endurecido com os seguintes parâmetros:  $v_c$  entre 80-260 m/min,  $f$  em 0,2 mm/rev e profundidade de corte de 0,2 mm. A ferramenta de nanotextura revestida reduziu (em relação à ferramenta não texturizada e sem revestimento) o coeficiente de atrito de aderência médio em 11,1–16,4%, coeficiente de atrito deslizante em 17,1–24,4% e coeficiente de atrito aparente em 14,1-19,8%. A tensão normal média da nanotextura revestida aumentou em 6,1–10,0% e a tensão de cisalhamento média reduziu em 9,0–11,8% em comparação com as ferramentas não texturizadas e sem revestimento.

No estudo de Orta Choudhury (2018) foi investigado o efeito de três diferentes texturas lineares na superfície de saída, geometricamente modeladas: horizontal, vertical e elíptica. Algumas texturas foram impregnadas com lubrificante sólido MoS<sub>2</sub>, enquanto outras foram trabalhadas à seco. Essas texturas foram produzidas em ferramentas cerâmicas por um laser Epilog. Para testar os efeitos da condição, foi realizado um torneamento com uma peça de aço AISI 4340 com 55 HRC com  $v_c$  entre 50-190 m/min,  $f$  entre 0,1-0,2 mm/rev e  $a_p$  de 0,5 mm. Experimentos realizados com texturas mostraram melhoria na força de corte, coeficiente de atrito, ângulo de cisalhamento e temperatura de corte em comparação com não texturizadas. Os insertos de corte com texturas verticais foram os mais eficazes com a redução máxima de 11,9% no coeficiente de atrito.

No trabalho de Kang et al. (2018-A) foi realizado texturas em formas *grooves* e em *spots* (em relevo, sendo o oposto de *dimples*). Elas foram realizadas por texturização de superfície a laser na superfície de saída de ferramentas de aço rápido e também de carboneto

de tungstênio. Para testá-las foi realizado um torneamento a seco em liga de alumínio 5083 com  $v_c$  de 180 m/min,  $f$  de 0,05 mm/rev. A textura *groove* reduziu as forças de atrito e as forças normais em cerca de 10% e 15%, respectivamente. Um menor coeficiente de atrito e uma melhor estabilidade de corte também foram observados. Diferente de estudos anteriores, essas vantagens não foram altamente influenciadas pela orientação das ranhuras, uma vez que, no corte de acabamento, a tensão normal no contato do cavaco com a ferramenta é relativamente pequena e o cavaco não se prende facilmente nas *grooves*.

Hao et al. (2018) estudaram o desempenho de corte de ferramentas de diamante policristalino texturizado. As texturas foram realizadas com laser pulsado de fibra, na forma de *grooves*. No teste de usinagem foi realizado um torneamento da liga de titânio Ti6Al4V com lubrificação MQL e os seguintes parâmetros:  $v_c$  entre 30-120 m/min,  $f$  de 0,16 mm/rev e  $a_p$  de 0,2 mm. Verificou-se que as ferramentas texturizadas reduziram as forças de corte e o coeficiente médio de atrito. O coeficiente de atrito médio de ferramentas texturizadas reduziu de 10,9% e 11,5% quando a velocidade de corte foi definida em 90 m/min, em comparação com ferramentas não texturizadas. O desgaste da ferramenta e a adesão da ferramenta também foram reduzidos.

No trabalho de Gajrani, Kumar e Sankar (2018-B), diferentes tipos de texturas foram fabricados numa ferramenta de carboneto de tungstênio usando penetradores de ensaio de dureza Vickers, produzindo *dimples* e *grooves* lineares paralelos ou perpendiculares à aresta de corte, e algumas ferramentas foram revestidas com bissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ). Para testar foi feito torneamento a seco de aço AISI H13 endurecido, com os seguintes parâmetros:  $v_c$  entre 55-125 m/min,  $f$  entre 0,04-0,28 mm/rev e  $a_p$  de 0,5 mm. A força de corte foi reduzida na faixa de 4,23–10,82% (sem revestimento) e 7,31–17,41% (com revestimento), com textura perpendicular (a condição de melhor desempenho) em comparação com ferramentas de corte não texturizadas.

Arumugaprabu et al. (2019) realizaram um trabalho para estudar a presença de texturas na superfície de flanco de ferramentas de metal duro aplicadas na usinagem de Ti6Al4V, utilizando sistema com rebolo, as texturas *grooves* foram geradas escalonadamente. Os parâmetros de fresamento de topo (com lubrificação úmida) do aço AISI 1045 e dureza HRC28 foram  $v_c$  aproximadamente 100 m/min,  $f$  de 10 mm/min,  $a_p$  de 7 mm. Entre as diferentes combinações de passo e profundidade da textura, para o passo de 1 mm e uma profundidade de 70  $\mu\text{m}$  a taxa de desgaste da ferramenta reduziu em 53%. As forças de corte são reduzidas em 28% e 23% nas direções X e Y, respectivamente.

Arulkirubakaran et al. (2018) realizaram experimentos de torneamento na liga Ti6Al4V usando ferramentas texturizadas de carboneto de tungstênio com *grooves* paralelos, perpendiculares e cruzados ao fluxo de cavacos. As texturas foram produzidas por W-EDM na face do chanfro das ferramentas. Uma mistura de MoS<sub>2</sub> com óleo SAE 40 (80:20) foi usada como lubrificante semissólido e os parâmetros foram:  $v_c$  entre 60-120 m/min,  $f$  de 0,1 mm/rev e  $a_p$  de 0,5 mm. As ferramentas texturizadas reduziram significativamente as forças de usinagem em condições lubrificadas. O consumo de energia foi reduzido em 20%. A principal força de corte foi reduzida em até 30% com a ferramenta de textura linear perpendicular. Tal efeito justificou-se devido ao menor contato ferramenta-cavaco, aprimoramento da lubrificação e ausência de formação de aresta postiça.

#### ***2.4.8 Efeito na Temperatura de Usinagem***

No trabalho de Lian et al. (2018), nanotexturas foram produzidas na superfície de saída e de flanco em ferramentas de corte de metal duro YS8 (WCTiCCo) através de laser femtossegundos. Em seguida, o revestimento de WS<sub>2</sub> foi depositado na ferramenta texturizada. Para testar as ferramentas, foi feito um torneamento a seco de aço temperado e revenido AISI 1045 com os parâmetros:  $v_c$  entre 50-250 m/min,  $f$  de 0,1 mm/rev e  $a_p$  de 0,3 mm. Em relação à ferramenta não texturizada e sem revestimento, a temperatura de corte das ferramentas reduziram de: 10-12% com apenas revestimento, 8-9% com apenas textura, e 12-16% com ambos (textura e revestimento). A ferramenta com textura e revestimento teve as menores temperaturas de corte entre todas as ferramentas testadas, especialmente em condições de velocidade relativamente alta.

No trabalho de Singh, Dureja e Dogra (2019) foi estudado os efeitos de diferentes lubrificantes para o processo de torneamento de um aço temperado AISI 4340. Foi utilizada uma ferramenta de metal duro não revestida, a qual foi texturizada nas superfícies de folga e saída. O método para realizar esta textura foi o laser de femtossegundos, gerando textura do tipo *dimple*. Os fluidos, aplicados em MQL, variavam entre óleo de canola puro e com grafeno (1% em massa); variou-se também a condição entre jato simples (somente na superfície de saída) e duplo (ambas superfícies). Parâmetros:  $v_c$  entre 70-170 m/min,  $f$  de 0,15 mm/rev e  $a_p$  de 0,5 mm. A temperatura de corte em todas as condições com uso de óleo de canola foi 21-43% menor do que a condição seca, mas 18-45% maior do que com o grafeno no fluido. Os resultados indicam que as texturas tipo *dimple* potencializam o efeito do lubrificante aplicado.

Para estudar ferramentas de carboneto de WCTiCCo, Song et al. (2017) utilizaram  $\mu$ -EDM para fabricar *dimples* texturizados na superfície saída, e as texturas foram embutidas com grafite para dar à ferramenta um efeito auto-lubrificante. Os ensaios de torneamento a seco no aço temperado AISI 1045 foram realizados com os parâmetros:  $v_c$  entre 60-180 m/min,  $f$  de 0,1 mm/rev e  $a_p$  de 0,2 mm. A temperatura de corte da ferramenta de metal duro embutida com grafite teve uma redução entre 15-20% em relação à ferramenta convencional. Os principais mecanismos responsáveis pela redução da temperatura de corte foram dois. O Primeiro é devido à alta temperatura de corte e fricção de cavacos, que fez o grafite ser liberado dos *dimples*, formado um filme lubrificante descontínuo fino na interface ferramenta-cavaco, o que é benéfico para diminuir a temperatura do cavaco e da ferramenta causado pela fricção do cavaco da ferramenta e deformação do cavaco. O Segundo é atribuído ao comprimento de contato real reduzido na interface cavaco-ferramenta, devido aos *dimples*, o que é propício para diminuir a temperatura do cavaco e da ferramenta causada pelo atrito do cavaco da ferramenta, fornecer mais grafite e armazenar os resíduos dos cavacos. A diminuição da temperatura de corte contribuiu para reduzir o desgaste da ferramenta de metal duro.

No trabalho de Jesudass e Kalaichelvan (2018), foi estudado o torneamento a seco aplicado em amostras de aço macio EN3B e alumínio 6351, usando ferramentas texturizadas de aço rápido M42. As texturas foram feitas através de um endentador de dureza Vickers, tendo então uma estrutura de *dimple*. O teste teve os parâmetros:  $v_c$  entre 30-110 m/min,  $f$  de 0,143 mm/rev e  $a_p$  de 0,5 mm. A temperatura na ponta da ferramenta de corte durante a usinagem foi observada usando um pirômetro infravermelho. Os experimentos conduzidos com a ferramenta texturizada apresentaram redução da temperatura na ponta da ferramenta de corte para todas as condições. Para o alumínio foi observada redução na temperatura de corte de cerca de 3,28% para as ferramentas texturizadas. Para o aço carbono, obteve-se uma redução na temperatura de corte de cerca de 12,85% para as ferramentas texturizadas.

No trabalho de Sun et al. (2016), *grooves*, *dimples* e textura híbrida foram fabricadas através de laser Nd: YAG no chanfro de ferramentas de metal duro, e um lubrificante sólido (bissulfeto de molibdênio) foi aplicado para preencher as texturas. Para testar as ferramentas foi realizado um torneamento a seco do aço AISI 1045 com  $v_c$  entre 60-120 m/min,  $f$  de 0,1 mm/rev e  $a_p$  de 0,2 mm. O efeito benéfico da textura híbrida foi evidente no caso de alta velocidade de corte (120 m/min), em que as forças de corte foram reduzidas entre 7,1-33,3%, a temperatura de corte foi reduzida entre 6,9-21,7% e a rugosidade da superfície  $R_a$  foi reduzido entre 42,9-69,1%.

Lian, Chen e Mu (2019) estudaram os efeitos das texturas num processo de torneamento a seco de aço carbono AISI 1045, com ferramentas de metal duro em 3 condições: sem textura, com texturas nas orientações perpendicular à aresta de corte (profundidade 10  $\mu\text{m}$ ) e inclinada (profundidade 8  $\mu\text{m}$  e ângulo da aresta de corte 80°). O método para produzir as texturas foi a corrosão de plasma indutivamente acoplada (ICPE), e os testes de usinagem foram pautados nos seguintes parâmetros:  $v_c$  entre 50-250 m/min,  $f$  de 0,1 mm/rev e  $a_p$  em 0,3 mm. Dentro da faixa de velocidade de corte de 100 a 200 m/min, ambas as ferramentas texturizadas reduziram a força, a temperatura de corte e o coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta. No entanto, com uma velocidade de corte de 250 m/min, a eficiência da ferramenta com textura perpendicular ficou muito baixa: suas texturas foram enterradas sob cavacos derivativos. Em contraste, nas arestas inclinadas, os cavacos derivativos apenas aderiram às arestas da ferramenta. Porém em velocidade de corte muito baixas (50 m/min) as texturas pioraram a usinagem e se danificaram.

Sawant, Jain e Palani (2018) relatam em seus estudos a influência das texturas pelo processo de deposição de pó de arco transferido por microplasma ( $\mu$ -PTAPD) no chanfro de ferramentas de corte de aço rápido. Foi torneado (a seco) Ti6Al4V com as seguintes condições:  $v_c$  entre 45-105 m/min,  $f$  de 0,1 mm/rev e  $a_p$  de 1 mm. O uso de texturas *spot* resultou em menores valores de força, temperatura, rugosidade e desgaste de flanco em relação às ferramentas com textura *dimple* e sem textura. A textura *dimple* foi melhor nestes mesmos parâmetros, em relação à ferramenta sem textura. Os *spots* agem como aletas que aumentam a convecção e transferência de calor para a atmosfera, beneficiando a vida útil da ferramenta.

Para o estudo de Kumar e Patel (2018), foram realizados *grooves* em texturas na superfície de saída de ferramentas de corte de cerâmicas compostas de  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCN}$  usando o processo W-EDM. Para o teste, foi feito um torneamento a seco de aço temperado 5210 (62HRC) com  $v_c$  entre 110-180 m/min,  $f$  entre 0,12-0,2 mm/rev e  $a_p$  de 0,5 mm. As ferramentas texturizadas paralelas ao fluxo de cavaco resultaram em redução na potência de corte e adquiriram menores temperaturas em comparação com todas as outras ferramentas de corte. No caso das texturas perpendiculares à aresta de corte, o aumento de bordas na zona de corte da ferramenta levou ao incremento da temperatura de corte.

#### 2.4.9 Efeito na Rugosidade da Peça

De um modo geral, as texturas proporcionam melhorias na integridade superficial das peças usinadas. Zhou et al. (2019) investigou no processo de fresamento do Ti6Al4V a utilização de insertos de metal duro não revestidos utilizando *grooves* por laser Nd:YAG. Foi utilizado MQL com fluidos de corte convencional e com nanopartículas de  $Fe_3O_4$ , e nas seguintes condições:  $v_c$  de 30-125 m/min,  $f$  de 0,06 mm/rev e  $a_p$  de 0,6 mm. A rugosidade máxima da superfície foi reduzida em 27,75% com a ferramenta texturizada na presença de nanofluido, quando comparada com uma condição sem textura e com fluido convencional.

Li et al. (2019) realizaram um estudo de torneamento a seco e uma análise de método dos elementos finitos (MEF), em que compararam texturas feitas numa ferramenta de nitreto de boro cúbico (PCBN) para dois tipos de texturas *dimples*: a primeira com pequenos diâmetros de 80  $\mu m$  e próximos entre si, e outra com diâmetros maiores de 120  $\mu m$  e mais distantes entre si. As texturas foram feitas pelo método de laser de fibra rotativa. Foi torneado uma peça de aço endurecido GCr15 com os seguintes parâmetros:  $v_c$  entre 60-85 m/min,  $f$  de 0,1 mm/rev e  $a_p$  entre 2 e 3 mm. Comparado com ferramentas não texturizadas, as texturas de *dimples* reduziram a rugosidade da superfície. Forças de corte pequenas e baixa tensão de compressão foram benéficas para moldar uma boa morfologia da superfície e melhorar a qualidade superficial da peça.

Dhage, Jayal e Sarkar (2019) estudaram o efeito de diferentes resultados de texturas do tipo *grooves* em ferramentas de corte de metal duro para toronar a seco peças de aço AISI 1045. As texturas foram feitas por moagem e o torneamento realizado com  $v_c$  de 275 m/min e avanço de 0,1 mm/rev. Dentro da análise da correlação de ferramentas com texturas paralelas à aresta de corte, foi indicado que entre os vários parâmetros de rugosidade, a textura teve maior influência na curtose e altura média. A rugosidade absoluta da superfície foi reduzida na presença de texturas.

O artigo de Pan et al. (2018) aplicou três tipos de texturas em ferramentas de PCBN: *grooves* perpendiculares e paralelos à aresta de corte e *dimples*. As texturas foram feitas por laser de fibra (FLY-M10F). As ferramentas foram testadas em torneamento a seco de aço endurecidos GCr15 com os seguintes parâmetros:  $v_c$  entre 60-85 m/min,  $f$  de 0,1 mm/rev e  $a_p$  de 0,2 mm. Em comparação com as ferramentas lisas, as texturizadas em *dimple* foram as mais benéficas para reduzir a rugosidade da superfície da peça trabalhada, e a textura *groove* perpendicular foi a segunda, enquanto a textura de *groove* paralelo aumentou a rugosidade. Quando as ferramentas de *grooves* perpendiculares usinaram com  $v_c$  de 72 m/min, a qualidade

da superfície foi baixa devido a rebarbas serrilhadas na superfície da peça de trabalho. A rugosidade da superfície da peça de trabalho foi pequena com  $v_c$  entre 60 e 85 m/min, pois velocidades mais baixas eram capazes de inibir as rebarbas serrilhadas e produzir melhor qualidade superficial. Isso também ocorreu com velocidades superiores a 72 m/min. A rugosidade superficial obtida por ferramentas de *grooves* paralelos diminuiu com o aumento de velocidade de corte, mas ainda era maior que a das ferramentas PCBN normais. A qualidade da superfície obtida pelas ferramentas *dimple* foi melhor em todos os testes de usinagem, havendo um efeito inibitório nas rebarbas serrilhadas.

Pratap, Patra e Dyakonov (2019), em seu trabalho sobre micro-fresamento, utilizaram EDM para texturizar ferramentas de PCD. As texturas foram *grooves* lineares variando a quantidade e direção das linhas, mas sempre passando pelo centro da superfície da ferramenta de PCD. Uma usinagem a seco foi realizada em vidro BK7 com os seguintes parâmetros:  $v_c$  de 5 m/min,  $f$  entre 0,025-0,2 mm/rev e  $a_p$  de 0,005 mm. A largura e a rugosidade da superfície dos *grooves* mostraram uma tendência semelhante à da morfologia da superfície da peça. Este parâmetro teve um valor ideal com dois *grooves*. A rugosidade da superfície manteve-se abaixo de 100 nm (designada como superfície de boa qualidade na retificação com ponta de diamante). Ferramentas texturizadas, sem mostrar qualquer efeito significativo na ondulação regular da superfície, apenas restringem o arrasto do material e a ocorrência de marcas de velocidade zero na superfície, melhorando assim a qualidade geral da superfície.

## 2.5 Laser Femtossegundos

Há vários métodos de realizar a produção das texturas nas ferramentas, cada um com suas vantagens e desvantagens. Podem-se destacar alguns métodos como Lasers, FIB,  $\mu$ -AB, EVC, EDM, ICPE, PAWAJM e  $\mu$ -PTAPD e indo além há casos de pesquisadores que recorrem até mesmo a indentadores típicos de ensaios de dureza. Com os avanços tecnológicos, alguns métodos foram aperfeiçoados e barateados, tornando-se predominantes para esta finalidade. Como visto no *review* de Machado et al. (2021), nos últimos 5 anos, dois métodos se destacaram como os mais predominantes para produção de textura, sendo eles: EDM com 19% em todos os artigos estudados neste intervalo de tempo e laser com 65%. O método EDM ainda aparece como forte alternativa, devido ao seu baixo custo em relação ao laser. Uma comparação qualitativa entre os danos na superfície e dimensão da usinagem, geradas por esses métodos (e outros) pode ser visto na Figura 2.9.

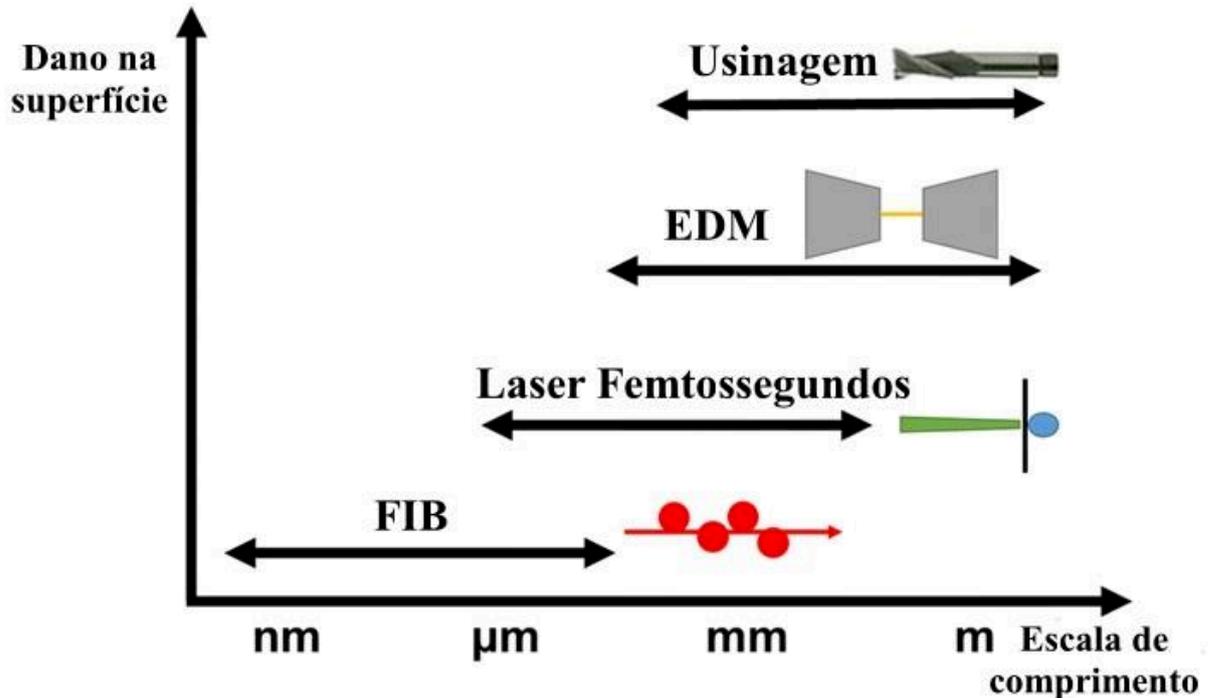


Figura 2.9 – Comparação qualitativa de escalas de comprimento acessíveis por várias técnicas de usinagem. Fonte: adaptado de Mcculloch, Gigax e Hosemann (2020).

O laser é um processo de usinagem não convencional, no qual a geração de cavaco é mínima, e sai em forma de material vaporizado. A sigla L.A.S.E.R. do inglês *light amplification by stimulated emission of radiation*, significa no português, Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação. O princípio da maioria dos lasers consiste no ato de um elétron orbital de um átomo ou uma molécula pular para um nível mais alto de energia, devido à absorção de um quantum de energia. Ao voltar ao seu estado natural, essa energia é liberada em forma de luz com energia do fóton menor que aquela absorvida pelo elétron. Assim, a emissão laser apresenta um comprimento de onda muito bem definido (monocromático), alta colimação e alta coerência de fase entre os fótons.

Estas propriedades permitem a obtenção de uma focalização com dimensão que pode ser da mesma ordem do comprimento de onda da emissão laser, ou seja, da ordem de micrometro na maioria dos casos. Também é possível controlar potência do feixe e da taxa de repetição para o caso de lasers pulsados. Nestes casos, os controles da energia e da largura temporal dos pulsos laser podem levar a intensidades extremamente elevadas, o que possibilita a fusão e evaporação controlada de qualquer tipo de material (Krueger e Kautek, 1995).

A escolha do Laser se popularizou devido às suas vantagens na produção da textura como alta precisão e reprodutibilidade. Em se tratando de microusinagem, existem diversos tipos de laser para cada aplicação. Laser Excimer são mais aplicáveis para trabalhar com polímeros e cerâmicos, já para marcações e furação é recomendado o Laser Nd: YAG. Para a microusinagem em metais é fundamental que o laser seja pulsado, com duração de pulsos de micro a nano segundos ou menores, pois esse parâmetro está diretamente correlacionado aos danos térmicos e mecânicos (rebarbas, trincas, mudanças na estrutura, etc.) (Preuss, Demchuk e Stuke, 1995 e Krueger e Kautek, 1995).

Um tipo de laser capaz de realizar microusinagem atendendo tais questões é o laser de pulsos ultracurtos, cuja largura temporal dos pulsos é da ordem de dezenas ou centenas de femtossegundos ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ). Este pode processar uma grande variedade de materiais (metais, polímeros, cerâmicos, semicondutores) sem causar de forma significativa danos térmicos e mecânicos na peça trabalhada. O laser de femtossegundos é um laser de pulso ultracurto, em que a transferência de calor é tão desprezível que este tipo de laser é capaz de cortar até mesmo materiais explosivos, por não realizar uma troca térmica ou ondas de choque a ponto de iniciar uma ignição (Fermann, Galvanauskas e Sucha, 2002). Devido a essas características, esse laser se tornou comum tanto em aplicações em pesquisa, quanto em indústrias e até mesmo ramos fora da engenharia, como a medicina. Porém, há ainda mais fatores que é preciso se considerar na escolha do laser, tais como custos, confiabilidade, processamento e rendimento.

A diferença entre o laser de femtossegundos e um laser de nanossegundos consiste em que no caso do último, a ablação de pulso longo induz os elétrons e a rede a permanecerem em equilíbrio térmico, e assim, durante o pulso do laser, o calor se difunde para fora da área irradiada afetando termicamente o material. No caso do laser de femtossegundos, o pulso ultracurto induz a absorção da radiação inicial do laser pela superfície trabalhada através de elétrons (ligados e livres). A Figura 2.10 esquematiza tal efeito. Tal fenômeno ocorre em paralelo à excitação e ionização do material que então aquece rapidamente e transfere essa energia para o subsistema atômico das moléculas, quebrando sua ligação e expandindo-a.

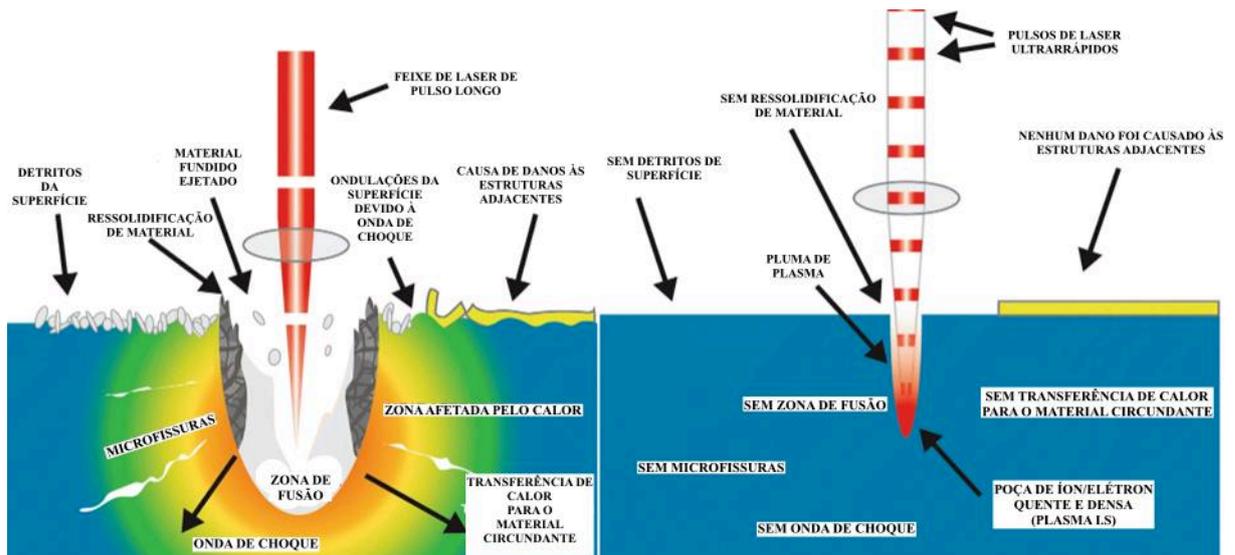


Figura 2.10 – Um diagrama comparando a usinagem a laser de pulso longo (esquerda) e o Femtossegundos (direita). Fonte: adaptado de Mcculloch, Gigax e Hosemann (2020).

O efeito de ablação (para materiais sólidos) típico de um laser de femtossegundos consiste em energia na faixa de  $10^1$  e  $10^2$   $\mu\text{J}$ . Quando esses tipos de pulsos são incididos no material, a duração dessa incidência é menor que o período vibracional dos íons da rede do material. Dessa maneira, a maior parte da energia do pulso irá ser absorvida pelos elétrons, aquecendo-os. Porém, antes da ruptura das ligações é possível ocorrer um aquecimento da rede que irá gerar uma pequena ZAC (zona afetada pelo calor), a qual pode ser controlada e até mesmo desprezada quando os parâmetros de irradiação estão apropriados para o material trabalhado (Samad et al., 2012).

A etapa de ejeção do material é caracterizada pela explosão de Coulomb dos íons (Reif e Costache, 2006 e Bulgakova et al., 2005) em que o laser faz os elétrons vibrarem e se desprenderem, devido a grande energia cinética, deixando um desequilíbrio de carga para os íons da rede. Esse desequilíbrio de carga causa uma explosão que faz o material atingir sua temperatura de vaporização, que então sofre uma forte expansão adiabática que elimina tanto o material da superfície, quanto a maior parte da energia térmica que iniciou o fenômeno. Em alguns casos, essa vaporização não é perfeita, e pode deixar fragmentos de materiais na superfície.

Esse mecanismo citado anteriormente ocorre para metais, e apresenta uma fase anterior para dielétricos que se tornam localmente metálicos na região do ponto focal antes de seguir com o fenômeno de ablação. Nestes casos, de materiais não metálicos como o PCD, a presença de elétrons livres na superfície é gerada a partir da excitação dos elétrons da camada

de valência, devido ao efeito de multifotoionização do laser (Stuart et al., 1995 e Kautek et al., 1996). Após esta etapa, o material toma a sequência de efeitos descritos anteriormente, até atingir a sua vaporização. Existem poucos casos em que o processo precisa ser realizado em vácuo ou com isolamento de gases inertes.

Uma aplicação para o laser de femtossegundos consiste na geração de estruturas topográficas formadas a partir de um modelo prévio, ou seja, texturização de superfícies. Uma série de pequenos orifícios ou canais, quando produzidos em série e com mesmas condições e escala são capazes de operar similar a uma microusinagem comandada numericamente, gerando texturas com alta precisão dimensional. Estruturas de geometrias complexas podem ser obtidas facilmente, desde que se conheçam os fenômenos que o laser gera no material escolhido. As precisões lateral e vertical dependem, entre outros, do comprimento de onda e da fluência utilizada, ou seja, para a produção de uma textura é importante não só definir o caminho do laser, mas também a densidade de energia e a taxa de sobreposição de pulsos sobrepostos (Figura 2.11).

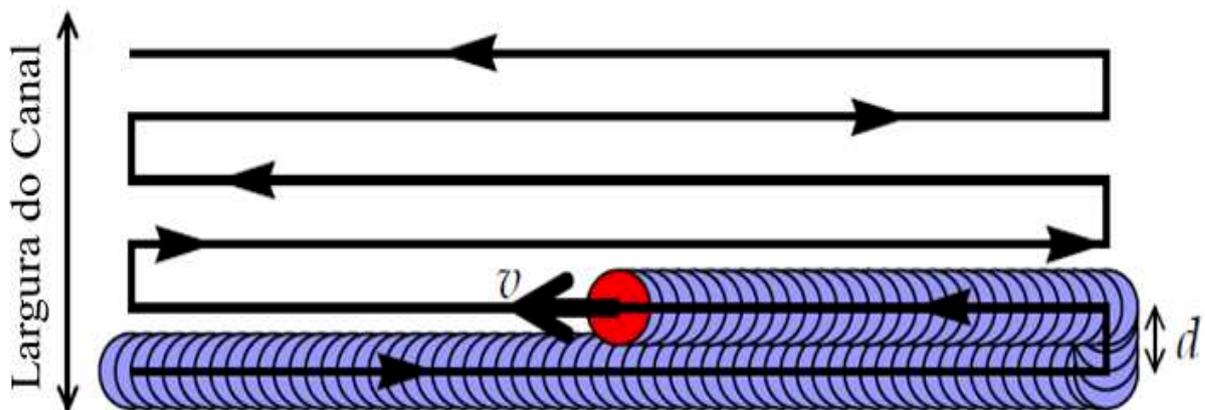


Figura 2.11. Diagrama do caminho do feixe laser para uma camada gravada. A direção de varredura é normalmente paralela ao eixo longitudinal do canal. Fonte: adaptado de Samad et al. (2012).

A otimização do trajeto e número de pulsos é fundamental, pois, os danos produzidos em um ponto aumentam à medida que o número de disparos de laser incide num mesmo local. O mesmo vale para aumento de energia no pulso. Dessa maneira, é comum o uso de um modelo 2D para o trajeto, e a determinação da profundidade depende dos parâmetros do laser para o material usinado (frequência, potência, velocidade, etc.).

Em se tratando dos parâmetros fundamentais de processamento de laser, destacam-se os seguintes:

- Comprimento de onda laser,  $\lambda$  (nm);
- Energia de pulso,  $E_p$  ( $\mu$ J);
- Duração do pulso,  $\tau$  (fs);
- Taxa de repetição de pulso,  $R_p$  (kHz);
- Velocidade de varredura,  $V_s$  (mm /s);
- Qualidade do feixe  $M^2$ ;
- Comprimento focal,  $f$  (mm);
- Diâmetro do feixe,  $d_b$  (mm);
- Abertura numérica da objetiva de foco, NA
- Pico de laser potência,  $P_p$  (GW);
- Potência média,  $P_{avg}$  (mW);
- Intensidade do feixe,  $I_p$  (W /cm<sup>2</sup>);
- Área do ponto focal,  $A_f$  (cm<sup>2</sup>);
- Diâmetro do ponto focal,  $D_f$  (mm).

### ***2.5.1 Laser femtossegundos em PCD***

Fork, Greene e Shank (1981) foram pioneiros em aplicar um laser de pulso ultracurto em PCD, utilizando pulsos de menos de 0,1 ps. Pelo fato de o diamante ser um material não metálico, e, portanto, sem elétrons livres, a abalação em sua superfície libera elétrons nas camadas de valência saltando de sp<sup>3</sup> para sp<sup>2</sup>. É importante lembrar que os diamantes naturais são transparentes, e como visto anteriormente, torna-se de difícil usinagem com lasers convencionais. Porém os PCDs são opacos e junto com propriedades térmicas (rever Tabela 2.3) são favoráveis à usinagem com laser.

Exemplos de parâmetros para a usinagem do PCD por laser de femtossegundos foram estudados em artigos como de Ogawa et al. (2016), que otimizaram o feixe do laser com intuito de evitar a grafitação do PCD e ainda assim manter um Ra abaixo de 0,02  $\mu$ m na camada superficial usinada. O laser de femtossegundos com luz polarizada linear pode produzir estruturas periódicas em superfícies (LIPSS), e em se tratando de diamante, estes LIPSS se mostram como estruturas características cristalinas e sem distorção na rede, e estão correlacionados diretamente com o comprimento da onda e a luz selecionada no laser. Ogawa

et al. (2016) concluíram que para comprimentos de onda entre 0,096 e 0,16  $\mu\text{m}$  esse efeito é quase nulo em diamantes.

Outro estudo que destaca a correlação dos parâmetros do laser com o PCD foi o trabalho de Sotillo et al. (2017), que para a produção de uma textura linear, concluíram que uma alta frequência do laser de femtossegundos (500 kHz) reduz significativamente o efeito de grafitização quando comparado a frequência mais baixas (como 5 e 50 kHz) e ainda melhora o parâmetro Ra na superfície da amostra. Essa conclusão também se repetiu em outros estudos, como de White et al. (2008), que realizou estudo similar, mas para texturas do tipo *dimple*.

Apesar do laser de femtossegundos ser um processo eficiente, com baixos danos nas peças, há ainda a precaução de se realizar um tratamento pós-laser para remover pequenos detritos que não foram capazes de vaporizar com o laser. Os métodos de remoção desses micro-cavacos envolvem escovamento ou mesmo polimento da superfície texturizada pelo laser, lembrando-se das limitações da dimensão da textura em relação ao equipamento utilizado. A utilização de pastas de polimento de diamante e solventes de hidrocarbonetos (como etanol ou acetona) podem ajudar (Zalloum et al., 2010 e Kononenko et al., 2016). Limpeza ultrassônica em alta frequência (15 a 400 kHz) permite por meio das bolhas de cavitação, a remoção apenas de detritos de dimensões pequenas em relação à textura produzida. Nesse tipo de limpeza ultrassônica, é recomendada a submersão em ácido  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ou  $\text{HNO}_3$  por cerca de meia hora e então enxágue em água desionizada (Li, Wu e Wang, 2012 e Xing et al., 2018-B).

A facilidade no pós-processamento do laser de femtossegundos mostra-se como uma vantajosa aplicação deste tipo laser, uma vez os de pulso longo podem fundir os detritos dentro das texturas e exigir métodos mais rigorosos para a limpeza da superfície, incluindo em alguns casos até mesmo uma microretificação (Yang et al., 2019-B).

### 3 METODOLOGIA

O material escolhido para o estudo é o Alumínio 2011-T4. Como todo material usinado, o alumínio possui as suas vantagens e desvantagens, e através do uso de ferramentas texturizadas busca-se amenizar as dificuldades no corte deste material, tornando então sua aplicação ainda mais vantajosa. Porém, as texturas para essa situação ainda são pouco estudadas e busca-se aqui uma resposta para as melhores combinações de parâmetros a fim de aprimorar a usinagem desse metal tão amplamente utilizado.

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

Este projeto busca realizar estudos baseados em experimentações, as quais serão fundamentadas em trabalhos anteriores que buscaram estudar os efeitos da texturização em usinagem. O torneamento longitudinal externo de tarugos de alumínio 2011-T4 será realizado em uma bancada feita no laboratório LEPU-UFU, e a análise dos resultados serão realizadas por meio de métodos estatísticos (Anova). A seguir serão descritas as etapas que envolvem toda a metodologia desta pesquisa.

#### 3.1 Equipamentos e Insumos

Para realização deste projeto foram utilizados os equipamentos listados a seguir:

- Torno CNC Multiplic 35D (Disponível: LEPU-UFU). Esse torno será a base para realizar os testes tanto de temperaturas quanto os relativos às forças de corte;
- Laser femtossegundos Ti:safira, modelo Element PRO 400, e amplificador Femtopower Double 10 kHz, ambos da Femtolasers Produktions GmbH (Disponível: IPEN). A execução da etapa do projeto que envolve esse equipamento foi realizada no IPEN, que em

paralelo à produção das texturas nas ferramentas, levantou suas características em ensaios de interferometria;

- Perfilômetro óptico 3D por interferometria de luz branca ZeGage Zygo (Disponível: IPEN). Para a geração de gráficos 3D das texturas e vistas de perfil da seção;
- Dinamômetro Kistler 9265B (Disponível: LEPU-UFU). Esse equipamento permite a aquisição das componentes de forças em 3 direções ortogonais, correspondendo às forças de corte, avanço e passiva. Amplificador de sinal também fabricado pela Kistler, modelo 5019 (Disponível: LEPU-UFU). Equipamento fundamental para comunicação entre o dinamômetro e o software para registro das forças do processo de usinagem;
- Termocâmera Flir A325 (Disponível: LAPROSOLDA-UFU). Equipamento com taxa de aquisição de 30 Hz e resolução de 320x240 pixels;
- Rugosímetro Taylor Hobson® modelo Surtronic-S128 (Disponível / LEPU-UFU). Possui um apalpador de diamante com raio de ponta de 0,2  $\mu\text{m}$  resolução de 0,05  $\mu\text{m}$ ;
- Microscópio ferramenteiro SZ6145TR OLYMPUS (Disponível: LEPU-UFU)
- Microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO MA10 (Disponível: FEQ-UFU);
- Microdurômetro HMV-2 Shimadzu (Disponível: LTM-UFU).

Lista-se a seguir insumos utilizados no projeto

- Tarugos de Alumínio 2011-T4 (Disponível: LEPU-UFU). Os tarugos são barras extrudadas de dimensões médias de 60 mm diâmetro e 600 mm de comprimento. O grande índice de esbeltez (para operação de torneamento) é justificado pela necessidade de um longo percurso da ferramenta para estabilizar a aquisição de temperatura;
- Insetos de PCD, fornecidos pela MAPAL (compatíveis com o código ISO: CPGW 120404), detalhados nos Anexos 1 e 2). Foram disponibilizadas 16 arestas de corte, sendo 12 texturizadas (3 arestas para cada um dos 4 tipos de texturas) e 2 arestas reservadas sem texturas para comparação de testes. Outras duas arestas foram reservadas em caso de avaria de alguma textura, para então produção e substituição de uma nova aresta texturizada;
- Suporte porta-ferramentas (compatível com o código ISO: SCXPR 2525 M12), fornecido pela MAPAL (detalhado no Anexo 3). Consiste em 1 porta-ferramenta para usinagem à direita, de base 25x25 mm;

- Lubrificante sólido de MoS<sub>2</sub> (comercializado por ER do Brasil). Material em pó com 98% de pureza;
- Pasta de diamante 0,5 µm Polish. Utilizado para auxiliar na remoção dos detritos do interior das texturas nas placas de PCD;
- Selante de silicone OrbiVed337. Com resistência até temperaturas de 320°C, este selante aglutina o pó de MoS<sub>2</sub>, para que então o lubrificante seja removido de forma gradativa do interior da textura pelos cavacos, mantendo seu efeito de lubrificação por um maior tempo no percurso da ferramenta;
- Solução de Kroll. Sua proporção é de 3% de ácido fluorídrico e 6% de ácido nítrico, diluídos em água destilada. Utilizado para atacar as amostras de alumínio (e inclusive seus cavacos), para realização da análise metalográfica;
- Tinta preta fosca em spray Chemicolor 600°C para altas temperaturas. Com resistência até 600°C, essa tinta é utilizada para dar a emissividade adequada à ferramenta durante a aquisição de temperatura pela termocâmara.

### **3.2 Barra de Alumínio 2011-T4**

Para a usinagem foi escolhido o processo de torneamento de barras extrudadas de alumínio 2011-T4, que são caracterizadas pela presença mais de 5% de cobre, aproximadamente 1% de chumbo e bismuto (juntos) e menos de 1% de Fe. Estas barras foram tratadas termicamente e envelhecidas naturalmente.

As barras trabalhadas são esbeltas, com diâmetro médio de 60 mm e comprimento de médio de 600 mm. As dimensões das barras favorecem o torneamento, pois, as usinagens de alumínio com PCD são propícias para altas velocidades de corte e a aquisição da temperatura necessita de um tempo de percurso de pelo menos 20 segundos, para haver estabilização da temperatura. Logo, é preciso realizar um longo percurso de avanço da ferramenta na barra para atender tais demandas para a aquisição de dados. O índice de esbeltez da barra apesar de ser relativamente alto para uma operação de torneamento, não implicou em vibrações excessivas, pois a densidade do alumínio é baixa (em média três vezes menor que o aço) e, após um desbaste para limpeza e nivelamento da barra, não houve desbalanceamento relevante durante a usinagem. Mesmo assim, foi utilizada uma barra para cada textura, de tal maneira que os testes fossem realizados sempre com o mesmo diâmetro, a uma mesma distância da castanha e da ponta rotativa.

Essas barras são originadas de um processo extrusão e devido ao método de fabricação, a microestrutura do material possui pequenas variações de sua microestrutura, dependendo da direção do corte realizado. Dessa maneira, através de um ataque químico com, atacado com solução de kroll (3% de ácido fluorídrico e 6% de ácido nítrico, diluídos em água destilada) pode-se observar a diferença da microestrutura para cortes em seção transversal e longitudinal das barras, como mostrado nas Figuras 3.1 e 3.2.



Figura 3.1 – Corte na seção longitudinal à esquerda e transversal à direita. Nota-se que a curva à direita da amostra em seção transversal corresponde à superfície lateral da barra, e possui grãos maiores que o centro da barra, até uma profundidade de cerca de 2 mm.

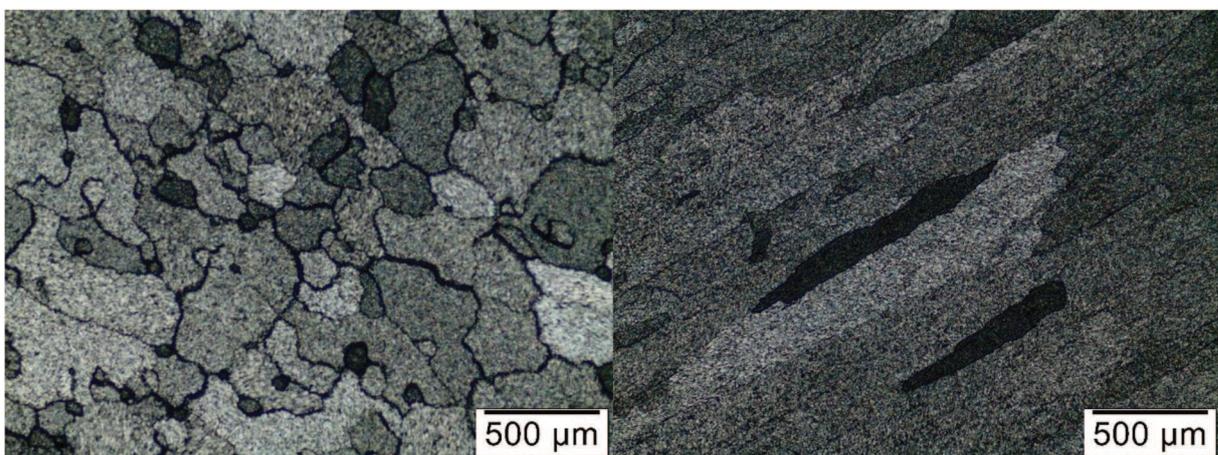


Figura 3.2 – Microestrutura do alumínio 2011-T4. À esquerda a tem-se a vista em corte transversal e à direita em corte longitudinal.

Os pequenos glóbulos de coloração mais escura presentes na matriz são os ligantes insolúveis presentes no Alumínio 2011, que correspondem aos elementos Fe, Bi e Pb. Estes glóbulos favorecem a usinabilidade desse material.

É notório o alongamento dos grãos devido à deformação do metal no processo de fabricação da barra, quando se comparam as duas seções. Também é importante ressaltar que na vista da seção transversal há grãos maiores da superfície até uma profundidade de cerca de 2 mm. Isso ocorre, pois o centro da barra resfria mais lentamente e se seus grãos passam por recristalização, enquanto a superfície da barra resfria rapidamente mantendo os grãos com o formato adquirido pela deformação do processo de extrusão. Tal fato merece destaque, pois, essa camada mais externa da barra possui propriedades ligeiramente diferentes de seu restante, e isso justifica a importância de realizar a limpeza da barra com um torneamento suficiente para remover tal região. No caso deste trabalho, em todas as barras foi realizado um torneamento com profundidade de 2 mm para esta limpeza.

Uma análise de EDS foi feita nas barras de alumínio e indicaram uma aproximação da composição química das barras, com (em média) 94% Al, 5% Cu, 0,5% Fe e 0,5% outros (Bi e Pb), sendo esta porcentagem em relação à massa. Os valores encontrados correspondem à composição indicada na literatura.

Também foram realizados ensaios de dureza no Laboratório de Tribologia e Materiais - LTM-UFU, em amostras da barra (excluindo a região superficial) e obteve-se uma dureza de média de 99 HV 0,05, com um desvio padrão de apenas 3,1 HV 0,05. A Figura 3.3 ilustra a aquisição da dureza com o software da HVM Shimadzu. A carga aplicada foi de 490 mN (HV 0,05) por um tempo de 15 segundos. O indentador consiste numa pirâmide de base quadrada e ângulo entre faces de 136°.

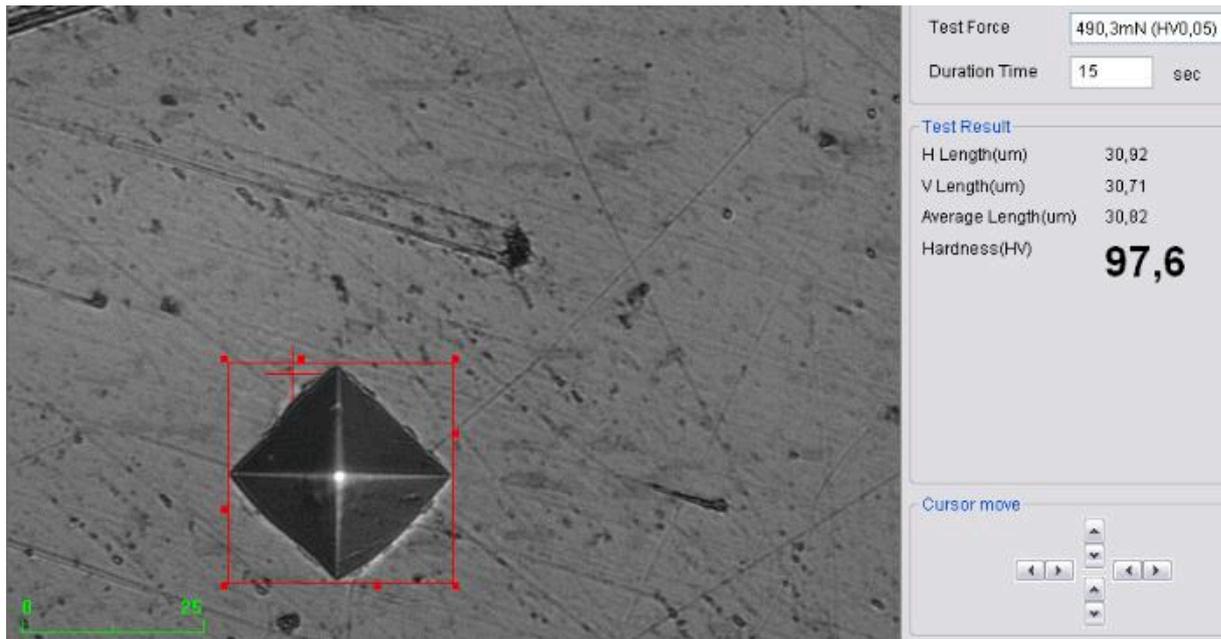


Figura 3.3 – Software HMV Shimadzu avaliando a microdureza do alumínio.

### 3.3 Ferramentas de Corte de PCD e Suporte

As ferramentas e suporte utilizados neste trabalho foram fornecidos pelas MAPAL, empresa que investe 6% de todo seu lucro em pesquisa e desenvolvimento. O número de ferramentas disponibilizadas foram 16. O modelo dos insertos é identificado como K83037 e foram produzidos unicamente para este projeto. Porém as dimensões são muito semelhantes ao inserto CPGW 120404 F01N-0AA, que pode ser consultado nos catálogos da Mapal (Mapal, 2021). Estas ferramentas possuem uma única aresta de corte. Cada aresta tem um raio de ponta de 0,4 mm e o comprimento da placa de PCD é de 3,6 mm, fator que limita a profundidade de corte no torneamento. No Anexo 1 as dimensões das ferramentas estão mais bem detalhadas. A Figura 3.4 ilustra a ferramenta de corte, dando destaque para placa de PCD em uma única aresta. O corpo da ferramenta é feito de metal duro.



Figura 3.4 – Exemplo de uma das ferramentas de PCD. À Direita é destacada a placa de PCD, que ocupa apenas uma pequena parte da ferramenta, sendo então uma única aresta para cada ferramenta.

Uma análise de EDS feita nas placas de PCD das ferramentas indicou que a composição química das mesmas eram (em média) 80% C, 13% W, 4,5% Co, 1,5% Ge e 1% Si (% em relação à massa).

Para uso exclusivo do projeto, também foi disponibilizado um suporte (ver Anexo 3) para as ferramentas, conforme as dimensões necessárias para o dinamômetro utilizado no projeto. Tal peça pode ser vista na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Ferramenta montada no suporte fornecido pela MAPAL.

Foram fornecidas algumas placas de PCD avulsas, com o objetivo da realização de pré-testes sem o comprometimento da quantidade de arestas de corte disponíveis. Essas placas avulsas foram utilizadas para calibração do laser, e para avaliação de químicos capazes de remover detritos das texturas sem comprometer a superfície do material.

Também é importante destacar que os modelos de ferramenta e suporte escolhidos não possuem características especiais (como chanfros e ângulos especiais) a fim de não mascarar os efeitos da textura nos resultados, destacando o efeito da texturização na usinagem. A superfície da placa de PCD plana e paralela à superfície do corpo do inserto de metal duro favorecem a produção da textura via laser.

Quando a pastilha é montada no suporte, a seguinte geometria é gerada: ângulo de posição principal: 95°; ângulo de ponta: 80°; ângulo de inclinação: 6,5°; ângulo de saída: 6,5°; ângulo folga: 4,5°.

### 3.4 Produção da Textura

Para a escolha do tipo de textura, vários artigos foram estudados com a finalidade de investigar conclusões ainda não evidentes para a relação da usinagem de um material muito dúctil com uma ferramenta de desgaste mínimo.

Estudos como o de Yang, Yu e He (2019-A) e Yang et al. (2020) dão uma clara correlação da influência de cada parâmetro da textura (tamanho, distância da aresta de corte, densidade e profundidade) na usinagem, porém, focando em apenas texturas do tipo *dimple*. Contudo, neste projeto foi executado apenas texturas em *grooves*, pois autores como Kang et al. (2018-A) indicaram que esta é uma das melhores geometrias para tornear alumínio. Autores como em Wu et al. (2017) até encontraram uma razão ótima entre largura e profundidade para textura *groove*, mas, se tratando apenas da usinagem de aço carbono.

Indo além, os *grooves* lineares foram as texturas de melhor desempenho para a atuação de lubrificantes sólidos, como visto no trabalho de Orta e Choudhury (2018). No que se refere a direção dos *grooves*, existem divergências entre autores, como no trabalho de Kumar e Patel (2018) e Grguraš Pusavec (2019) que concluem que uma direção mais favorável para a usinagem (em relação às forças de corte) é paralelo à aresta de corte (perpendicular ao fluxo de cavacos), e no trabalho de Su et al. (2018) a conclusão é oposta. Porém, vale destacar que os materiais trabalhados por esses autores são bem diferentes, e nenhum trabalhou com material tão dúctil como o alumínio.

Após tais observações ficou evidente a lacuna de estudos necessária a ser investigada. É preciso investigar o efeito das direções dos *grooves* na usinagem de materiais muito dúcteis e também indicar as melhores dimensões para tais texturas. Artigos que produziram texturas em PCD como os artigos da Tabela 3.1, evidenciam que os poucos trabalhos em ferramentas de PCD não se arriscam a produzir texturas além das dimensões já antes realizadas por outros trabalhos, e quando se varia, é para texturas muito pequenas. De tal forma, é difícil pressupor uma tendência para o ponto ótimo das dimensões das texturas.

Tabela 3.1 – Dimensões das texturas *grooves* produzidas em ferramentas de PCD em trabalhos recentes da literatura.

Artigo	Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Largura ( $\mu\text{m}$ )
Su et al. (2018)	53	60
Hao et al. (2018)	10	60
Su et al. (2017)	54	60
Ghosh e Pacella (2020)	2-8	7

Fonte: próprio autor.

Com base na Tabela 3.1, infere-se a necessidade de produzir texturas nas dimensões intermediárias entre as já estudadas e acima delas. É importante ressaltar que na confecção das texturas, o laser femtossegundos tem maior eficiência quando calibrado para produzir uma textura de largura igual à profundidade e, portanto, as dimensões escolhidas foram de 2 tipos de texturas: 45 e 120  $\mu\text{m}$  (profundidade igual à largura).

Sobre o início da textura em relação à aresta de corte, tal parâmetro raramente é debatido na literatura (sempre considerando texturas linear *groove*). Em se tratando de PCD, apenas o trabalho de Su et al. (2017) enfatizou tal informação, tendo realizado a produção das texturas com 250-330  $\mu\text{m}$  de distância da aresta principal de corte. Logo, não há muita base para estimar a região no PCD para a confecção da textura, porém, trabalhos como de Feng et al. (2019) que trabalharam com ferramenta cerâmica (características próximas do PCD), produziu sua textura a 100  $\mu\text{m}$  da aresta de corte. Portanto, devido à pequena área disponível de PCD na ferramenta, e a usinagem em baixa profundidade de corte, optou-se por produzir a texturas se iniciando a 120  $\mu\text{m}$  da aresta de corte, valor conservador considerando trabalhos como de Patel, Shah e Ozel (2019), que produziram a textura a 10  $\mu\text{m}$  da aresta de corte. Dessa maneira, para a usinagem com profundidade de corte de 2 mm e as texturas iniciando

120  $\mu\text{m}$  da aresta de corte, a área de contato entre o material usinado e a ferramenta será predominantemente superfície texturizada.

Já as direções foram definidas como paralela e perpendicular à aresta de corte. Todos os canais de todos os tipos de textura estão espaçados entre si por 120  $\mu\text{m}$ , e se iniciam numa distância de 120  $\mu\text{m}$  da aresta principal de corte. Dessa forma, foram realizados quatro tipos diferentes de texturas, que serão produzidas conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Tipos de texturas *grooves* lineares realizadas no PCD.

Textura	Direção (em relação à aresta de corte)	Profundidade e Largura
		( $\mu\text{m}$ )
PA45	Paralelo	45
PE45	Perpendicular	45
PA120	Paralelo	120
PE120	Perpendicular	120

Fonte: próprio autor.

As texturas serão realizadas na superfície de saída da ferramenta, dessa forma, sendo produzidas a partir do laser femtossegundos (pulsos ultracurtos), equipamento de propriedade do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN. O sistema laser de femtossegundos utilizado é de Ti:safira, modelo “Element PRO 400” da Femtolasers Produktions GmbH, amplificado pelo sistema “Femtopower Double 10 kHz”, também da Femtolasers.

Além de artigos base para definição de dimensões das texturas, também foram estudados artigos específicos para a escolha dos parâmetros do laser na confecção de texturas em PCD, sendo estes os artigos: Fang e Klein (2019), Ogawa et al. (2016) e Ali, Litvinyuk e Rybachuk (2021). Em pré-testes, e utilizando as placas de PCD, o laser foi devidamente calibrado. O feixe do laser é polarizado, definido com emissão centrada em 800 nm, largura temporal de 30 fs, energia por pulso máxima de 200  $\mu\text{J}$  e 10 kHz de taxa de repetição. Para o processo de usinagem, o feixe laser foi injetado em uma estação de trabalho modelo “PRJ0221-Femtolasers” da Laser Engineering Applications que guia o feixe até a lente de focalização. Nesse sistema, o ponto focal permanece parado e a amostra é movimentada por um estágio translador de três eixos da Aerotech, série ANT130, com precisão de aproximadamente 10 nm. A programação de movimentos é feita através do software Mastercam 2018 - Mill com pós-processador dedicado ao sistema laser. Quando focalizado

com uma lente de  $f = 20$  mm, o diâmetro do ponto focal é de aproximadamente  $3,6 \mu\text{m}$ . A Tabela 3.3 condensa os principais parâmetros acima citados.

Tabela 3.3 – Parâmetros típicos do laser femtossegundos utilizado para a confecção das texturas no PCD.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Largura do pulso	30 fs
Comprimento de onda	800 nm
Diâmetro do ponto focal	$3,6 \mu\text{m}$
Energia máxima do pulso	$200 \mu\text{J}$
Taxa de repetição do pulso	10 kHz

Fonte: próprio autor.

Posteriormente à produção da textura, foi realizado uma perfilometria 3D em luz branca (equipamento ZeGage Zygo), com software MountainsMap, para conferir as dimensões produzidas, e para verificar se estão dentro dos valores médios esperados, condizentes com a precisão do laser (foco em profundidade, largura e distanciamento das texturas). Como critério para medida de largura, essa foi realizada a uma profundidade de 15 a 20% da profundidade total, devido ao arredondamento da borda.

Também é importante lembrar-se da questão abordada no Tópico 2.5.1, em que autores como Zalloum et al. (2010) e Kononenko et al. (2016) alertam para a limpeza dos possíveis detritos que podem ser gerados na texturização do PCD. Dessa maneira, com auxílio de uma pasta de diamante ( $0,5 \mu\text{m}$ ) para polimento, as texturas foram escovadas, na direção de cada textura a fim de remover detritos. Após tais etapas as texturas são analisadas no microscópio e o processo foi repetido sempre que ainda restasse algum detrito.

### **3.5 Aplicação do Lubrificante Sólido nas Texturas**

Diversos estudos mostraram que lubrificantes sólidos tiveram impacto significativo na melhoria do atrito e redução de forças de corte, como em Vignesh et al. (2020) e Dheeraj et al. (2020). Normalmente, lubrificantes sólidos são aplicados em forma de uma fina película ou em forma de pó. Na usinagem de materiais duros, o cavaco não se deforma a ponto de tocar o fundo da textura, porém, o desgaste da ferramenta permite o cavaco chegar a pontos cada vez mais profundos na textura, e conseqüentemente o lubrificante armazenado na textura terá

contato com o fluxo de cavacos e atuará no corte. Porém, em se tratando de ferramentas que não se desgastam significativamente como na usinagem de alumínio com ferramentas de PCD, esse processo não acontece. Porém, a alta ductilidade do alumínio permite que o cavaco gerado se deforme a ponto de entrar parcialmente na textura e em contato com o lubrificante armazenado dentro dela. Para que o lubrificante não seja liberado rapidamente, é preciso aplicar um selante, a fim de tentar manter o fundo da textura com o lubrificante, e dessa maneira, espera-se, além dos efeitos já conhecidos de redução de atrito, evitar um empastamento do cavaco dentro da textura. Espera-se que o alumínio ancorado na textura deva fluir com o fluxo de cavaco, e não permanecer como uma porção do material fixa dentro da textura, pois caso isso ocorra, haverá atrito entre o alumínio preso na textura com o alumínio a ser usinado, gerando o efeito similar ao de uma aresta postiça de corte, com elevação do atrito no corte.

Antes da aplicação do lubrificante sólido é importante verificar se os canais das texturas não possuem detritos, pois estes podem atuar como abrasivos durante a usinagem. Por tanto foi realizado um escovamento manual com uma escova de microcerdas e umedecidas com acetona. Porém este processo não foi suficiente para remover todos os detritos. Logo, foi realizado um manual escovamento com pasta de polimento de diamante 0,5  $\mu\text{m}$  em suas cerdas, o qual foi capaz de limpar todos os canais texturizados. 1 ml de pasta foi suficiente para realizar tal procedimento em todas 12 arestas texturizadas.

O lubrificante sólido escolhido para este trabalho foi pó de bissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ). As partículas desse pó possuem diâmetros de até 5  $\mu\text{m}$  e espessura de aproximadamente 1 nm. Logo, podem facilmente preencher as texturas com as dimensões escolhidas. A aplicação do  $\text{MoS}_2$  foi realizada primeiramente com um pincel nas texturas, e na sequência uma mistura de selante com mais lubrificante. A proporção dessa mistura deve ser a máxima diluição do pó que o selante permitir para sua saturação, otimizando o efeito desejado. O selante aplicado foi silicone OrbiVed337, com resistência a temperaturas de até 320°C. A Figura 3.6 mostra três ferramentas texturizadas, sendo uma com a aplicação de lubrificante sólido (a do meio), outra com o excesso de lubrificante já removido e com os canais pré-preenchidos (a da direita na figura) e a última com a mistura de selante e lubrificante sólido sobre texturas preenchidas (a da esquerda). O excesso de selante deve ser removido com cautela pra não deixar vazios nas texturas. A Figura 3.7 ilustra este procedimento, incluindo uma ferramenta após o selante solidificado e sem demasias. Portanto não é necessário remover totalmente o excesso de selante pois, assim como a tinta aplicada para definir a emissividade da superfície da ferramenta, a presença de lubrificante e selante na

superfície da ferramenta (fora do interior das texturas) é irrelevante, e irá se perder no início da usinagem.



Figura 3.6 – Aplicação do lubrificante sólido e selante.

A Figura 3.7 mostra uma aresta de corte texturizada com a textura tipo PE45 (profundidade e largura de 45  $\mu\text{m}$ ). Na imagem à esquerda a textura está vazia, na central a textura está apenas com o lubrificante sólido, e na imagem da direita a textura está com o lubrificante e o selante solidificado e sem exceder para fora das texturas.

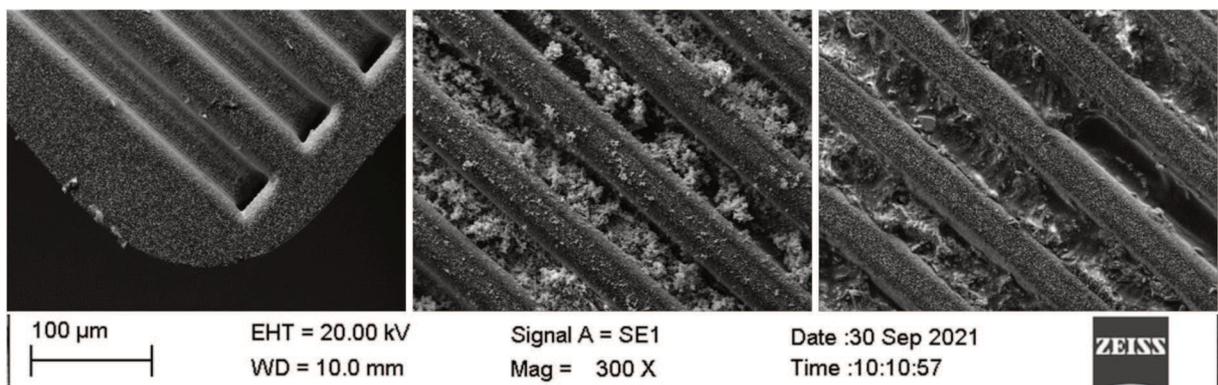


Figura 3.7 – Da esquerda para a direita, tem-se a sequência de aplicação do lubrificante na textura. Primeiramente tem-se a textura vazia, depois preenchida com MoS<sub>2</sub> e por último com a mistura de selante com o lubrificante.

### 3.6 Parâmetros de Corte e Ensaio

Para a realização dos ensaios, uma série de artigos sobre torneamento de alumínio com ferramentas texturizadas foram selecionados para prever os possíveis comportamentos deste material. São os trabalhos em que eles analisaram o torneamento de alumínio e texturas do tipo *groove* realizadas na superfície de saída da ferramenta de corte. São eles: Kang, Jun e Fu (2018-B), Kang et al. (2018-A), Wei et al. (2017), Xing et al. (2016), Rathod et al. (2016), Ghosh e Pacella (2020) e Zhu et al. (2016).

As medições de força e temperatura foram executadas simultaneamente, já a rugosidade foi medida após o corte, com cada peça sendo medida fora do torno. Os parâmetros de corte para todos os ensaios de usinagem foram definidos da seguinte maneira (e compilados na Tabela 3.4):

- Para velocidade de corte ( $v_c$ ), esta foi restringida pela a maior velocidade disponível no torno, considerando as dimensões da barra e arredondando os valores, para facilitar comparações com outros trabalhos. Uma segunda  $v_c$  foi definida como sendo metade da primeira e assim ficou determinado as  $v_c$  em 400 e 200 m/min.
- A profundidade de corte ( $a_p$ ), foi restringida pelas dimensões da placa de PCD da ferramenta de corte. A aresta de corte permitia uma profundidade máxima de 3,6 mm e, para evitar que o cavaco escoasse fora da área texturizada, definiu-se uma profundidade de corte fixa em 2 mm.
- Para manter a correlação de proporcionalidade (índice de esbeltez =  $a_p/f$ ) de 10, o avanço ( $f$ ) ficou fixado em 0,2 mm.

Tabela 3.4 – Parâmetros de corte

Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Profundidade de corte (mm)	Condição de Lubrificação
200 e 400	0,2	2	Seco e Com MoS <sub>2</sub>

**Fonte:** Próprio autor.

### ***3.6.1 Análise Metalográfica e Microdureza dos Cavacos***

A análise da metalografia foi realizada tanto no material da barra, quanto nos cavacos gerados, incluindo ensaios de microdureza que ajudaram a interpretar os resultados obtidos. Dessa maneira, os mesmos procedimentos já descritos para as amostras de Alumínio, no Tópico 3.1 (microdureza e metalografia), serão replicados nos cavacos gerados para cada um dos tipos de texturas aqui estudados.

Indo além, também será investigado se houve diferença no tipo de fratura e zona cisalhada dos cavacos, dentre outras características morfológicas, como o raio de curvatura.

### ***3.6.2 Análise de Força***

A aquisição das forças de usinagem foi realizada pelo Dinamômetro Kistler 9265B pertencente ao LEPU-UFU, cujo princípio de funcionamento é por cristais piezoelétricos, juntamente com um amplificador de sinal Kistler 5019A e placa de aquisição NIPCO6036E, da National Instrument.

As três componentes da força de usinagem: força de corte ( $F_c$ ), força de avanço ( $F_f$ ) e força passiva ( $F_p$ ) foram medidas, com taxa de aquisição de 100 Hz e tempo de amostragem de 10 segundos para cada teste, gerando 1000 pontos para cada componente de força. Lembrando que o corte é muito próximo de um corte ortogonal.

### ***3.6.3 Análise de Temperatura***

Ao se trabalhar com PCD, é importante estar atento à temperatura de trabalho, pois, esse material pode sofrer o processo de grafitação e comprometer sua estrutura, tornando-se um material frágil. Portanto, busca-se estudar se a temperatura de trabalho do torneamento com as arestas texturizadas vai se estabilizar em uma região de temperatura ideal para o PCD. Apesar do processo de grafitação ter início por volta de 780°C/800°C, estudos como de Jaworska et al. (2014) mostraram que por volta de 480°C, a matéria do PCD pode reagir ao calor recebido.

A aquisição da temperatura de corte foi realizada com uma termocâmara Flir A325, disponibilizada pelo LAPROSOLDA-UFU. Esse equipamento tem taxa de aquisição de 30 Hz e resolução de 320x240 pixels. A câmera foi posicionada sem contato com o torno, para evitar interferência de vibrações, numa posição fixa, 755 mm acima da ferramenta. Para melhor resolução, a porta de proteção do torno permaneceu aberta durante os ensaios, e a lente da câmera ficou protegida de cavacos por um vidro de germânio. A montagem pode ser vista na Figura 3.8, que mostra também o dinamômetro, assim a aquisição dos dados da força e temperatura de corte foram obtidos simultaneamente.



Figura 3.8 – Termocâmara filmando de cima uma das barras de alumínio que está sendo usinada no torno Romi, enquanto o suporte está instalado no dinamômetro.

O tempo de aquisição foi definido após um pré-teste, que mostrou que a temperatura de corte se estabiliza em menos dos 10 segundos (necessários para a aquisição das forças de corte). Na Figura 3.9, pode-se notar que após 5 segundos de usinagem a temperatura já se estabiliza. Em pré-testes com até 30 segundos mostraram que após esta estabilização, a temperatura quase não aumenta. Ressalta-se que a temperatura aqui obtida corresponde a uma aproximação da superfície da ferramenta, e não à temperatura da interface cavaco-ferramenta.

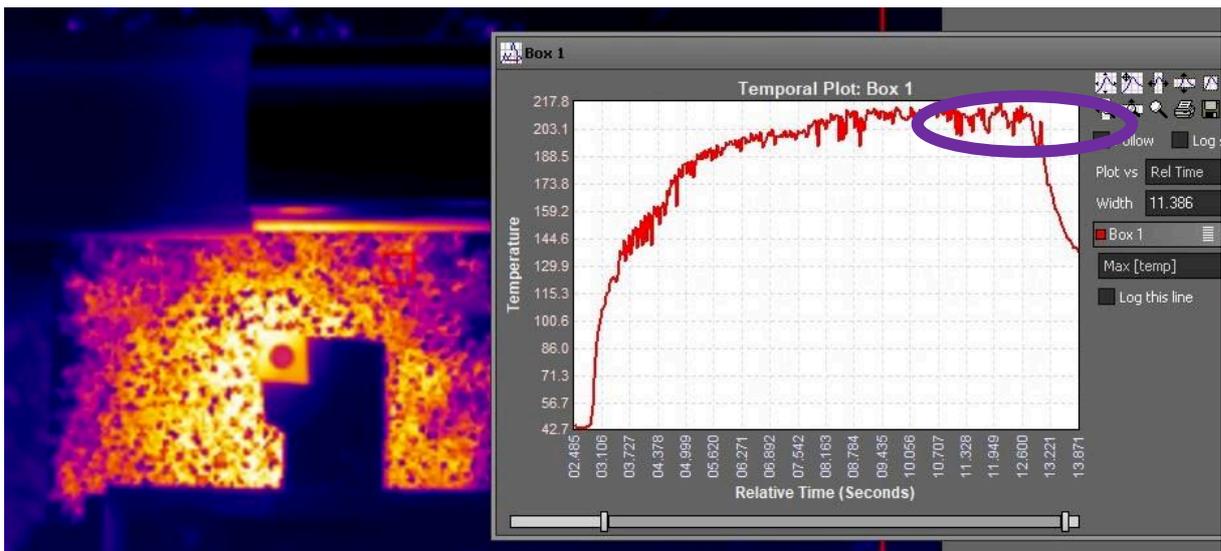


Figura 3.9 – Estabilização da temperatura após 5 segundos de torneamento. O gráfico mostra, para cada frame, a maior temperatura dentro do enquadramento escolhido.

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

O método da análise da temperatura consistiu em (após a seleção da região dos últimos 5 segundos de usinagem com a temperatura estabilizada, ver Figura 3.9) realizar uma média da maior temperatura de cada frame, sempre no mesmo enquadramento para todos os testes.

### 3.6.4 Análise da Rugosidade da Superfície da Peça Usinada

Foram realizadas três medições com o rugosímetro, espaçadas de 120° rotacionando a barra em cada uma das superfícies usinadas nos testes. Foi utilizado o filtro gaussiano e cut-off de 0,8 mm, campo de 100 µm e comprimento de avaliação Lm de 4 mm. Tais parâmetros foram definidos com base na norma NBR ISO 4288 (especificações geométricas de produto, regras e procedimentos para avaliação de rugosidade.), a qual recomenda um cut-off de 0,8 mm e Lm de 4 mm quando o RSm estiver entre 0,13 e 0,40 mm Os parâmetros analisados foram Ra, Rq e Rz . Os dados foram tratados a partir do software TalyProfile Lite.

### 3.7 Análise Estatística

Com o número de arestas disponíveis, foi definido que a realização dos testes fosse configurada por um fatorial fracionado do tipo  $2^{4-1}$ . A Tabela 3.4 detalha os parâmetros das condições estudadas. Para evitar interferência da ordem dos resultados, os ensaios foram realizados de forma aleatória. Logo, para cada variável de resposta (força, temperatura e integridade superficial da peça) foram realizados testes em 8 condições distintas, com 2 réplicas cada, totalizando 24 ensaios. É importante ressaltar que, além da combinação de ensaios citados nesta Tabela 3.5, também serão realizados ensaios com ferramentas lisas (sem texturas) nas mesmas condições de usinagem.

Tabela 3.5 – Matriz de Planejamento para os ensaios com fatorial fracionado  $2^{4-1}$ .

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

Sobre os parâmetros citados na Tabela 3.5 é importante lembrar que a direção das texturas está referenciada em relação à aresta de corte da ferramenta. A profundidade e largura das texturas são iguais em valores.

Os resultados dos ensaios foram analisados a partir do software Statistica<sup>®</sup>, sempre com um nível de confiança de 95%. Primeiramente, foi realizada uma análise de variância (Anova) para avaliar a significância dos parâmetros abordados e analisar os dados obtidos após a experimentação. Dessa maneira, foi possível gerar um gráfico com diagrama de Pareto, o qual é capaz de relacionar a significância dos parâmetros estudados com a estimativa do efeito padronizado das variáveis de resposta (força, temperatura e rugosidade da peça).

Para a análise da força, incluindo o gráfico de Pareto, foi considerado apenas a componente de força de corte, pois a componente de força de avanço teve problemas na aquisição e a força passiva foi muito próxima de zero. Para a temperatura, a metodologia de investigação da média da maior temperatura nos últimos 5 segundos de usinagem foi a referência considerada. Por último, a rugosidade da peça usinada, foi avaliada com base nos parâmetros Ra, Rq e Rz. Na análise de Pareto para a rugosidade da peça, apenas o parâmetro Ra foi usado, pois todos os parâmetros de rugosidade seguiram a mesma tendência e proporção nos resultados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados experimentais encontrados nesse trabalho estão apresentados e discutidos neste tópico, buscando explicar os efeitos da texturização de arestas de corte na usinagem do alumínio 2011-T4. Será discutida, primeiramente, a fabricação das texturas, e então seu comportamento nos ensaios de torneamento. Na sequência, serão avaliadas as diferentes morfologias do cavaco obtido ao se comparar o efeito da presença ou ausência de texturas. Também será discutido o efeito da presença do lubrificante sólido neste terceiro tópico.

Sobre os tipos de texturas realizados (rever Tabela 3.2), é conveniente antecipar que os tipos de textura com *grooves* na direção paralela à aresta de corte não favoreceram o torneamento do alumínio nas condições avaliadas, e em alguns casos até mesmo pioraram e houve a quebra da ferramenta nas arestas de corte. Tal fenômeno, também será justificado, correlacionando o tipo de material usinado e suas particularidades, quando usinado com ferramentas texturizadas, informação que não está bem detalhada na literatura.

Por fim, serão abordadas as análises de força, temperatura e rugosidade da superfície da peça. Nesses tópicos serão discutidos não só o efeito da presença de texturas, mas os efeitos dos variados tipos de texturização, dentre os outros parâmetros avaliados.

### 4.1 Texturas Produzidas

Os quatro tipos de texturas foram produzidos com sucesso nas superfícies de saída das ferramentas de PCD. A Figura 4.1 ilustra esses quatro tipos de texturas. A aresta de corte utilizada como referência para o torneamento é a aresta do lado direito das imagens.

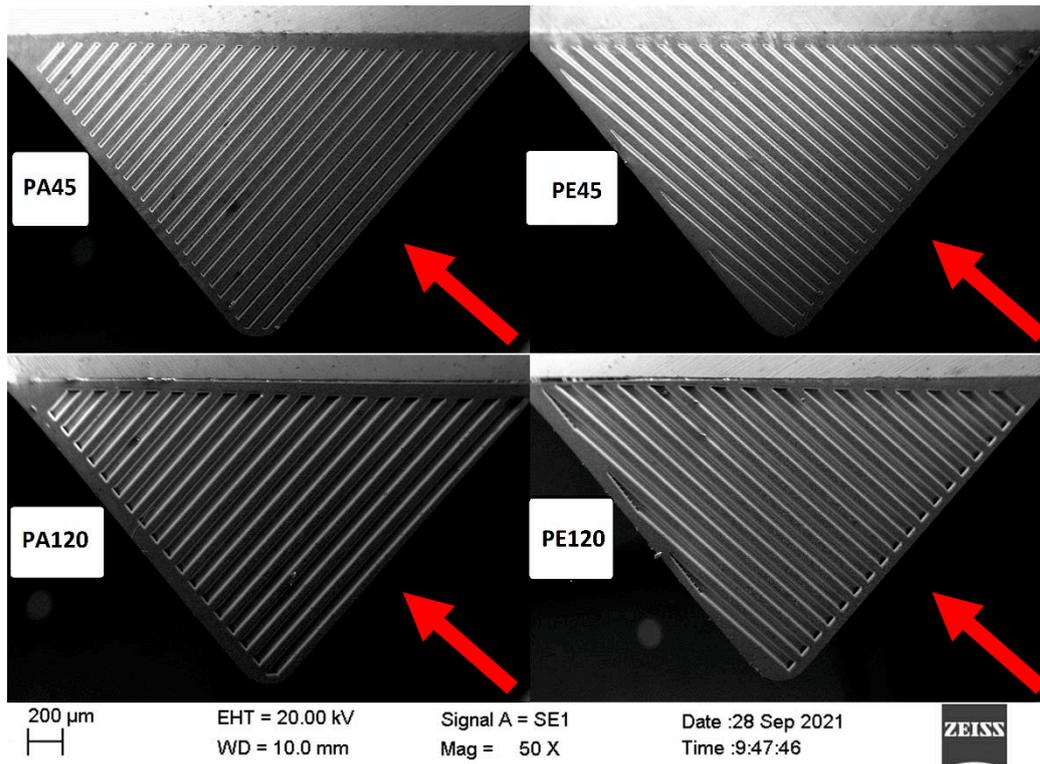


Figura 4.1 – Tipos de texturas produzidas nas placas de PCD das ferramentas de corte. A aresta principal de corte corresponde à aresta ao lado direito de cada placa de PCD na figura. As setas apontam para as arestas principais de corte, e indicam a direção e sentido do fluxo dos cavacos.

Como pode ser observada na Figura 4.1, a quantidade de detritos presos é mínima, principalmente nas texturas de 120  $\mu\text{m}$  (tipos PA120 e PE120). Como descrito no tópico 3.5, tais detritos foram removidos através de uma escovação manual com escova de microcerdas e pasta de diamante.

A análise de perfilometria realizada para as texturas do tipo PA45 e PE45 mostraram que o erro tanto na profundidade da textura quanto na largura varia entorno de  $\pm 5 \mu\text{m}$ . O perfil da seção transversal da textura mostra que elas não são quadradas (lembrando que o interferômetro não tem apalpador, seu princípio de funcionamento é com luz branca), sendo que a largura inicia no valor projetado e vai se afunilando ao longo da profundidade, enquanto a profundidade máxima é encontrada na parte central da textura apenas. Ver Figura 4.2.

Para as texturas do tipo PA120 e PE120 o laser produziu *grooves* de dimensões de largura mais constantes ao longo da profundidade. Elas se iniciam com valores próximos de 130  $\mu\text{m}$ , mas logo se estabilizam nos 120  $\mu\text{m}$  pretendidos. A profundidade máxima também se manteve relativamente constante. Ver Figura 4.3.

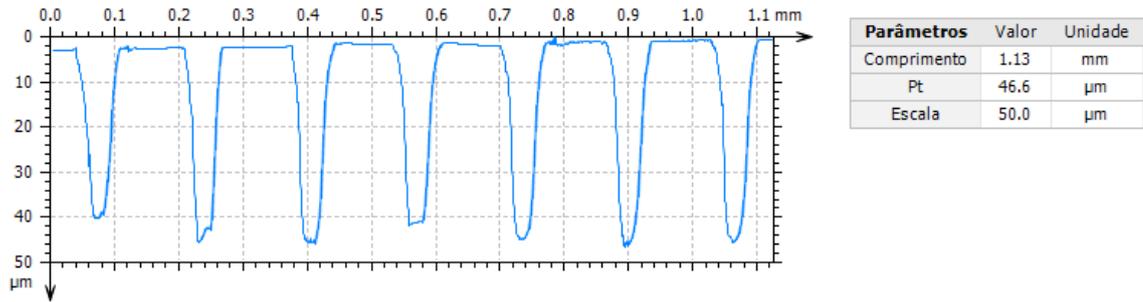


Figura 4.2 – Seção transversal de uma textura de 45 µm (tipos PA45 e PE45)

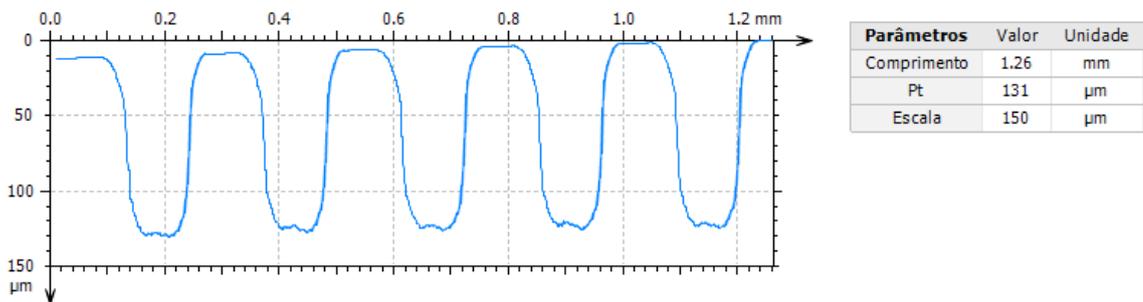


Figura 4.3 – Seção transversal de uma textura de 120 µm (tipos PA120 e PE120)

As Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 são gráficos 3D gerados a partir da perfilometria. Nestas figuras também é possível ver as marcações que originaram o corte da seção transversal vistos nas figuras anteriores (Figuras 4.2 e 4.3). Nelas é possível observar a alta qualidade das texturas produzidas pelo laser femtossegundos. Não há presença de detritos nas regiões analisadas, e as imperfeições na superfície consistem apenas em impurezas já presentes no próprio PCD.

Nota-se, especialmente nas Figuras 4.6 e 4.7, que a profundidade da textura aumenta ao final do passe do sulco (último 0,5 mm), o que já é de se esperar, pois neste momento o deslocamento do feixe se desacelera (mesmo que pouco) para se reposicionar em outro passe. Para texturas de profundidade de 45 µm esse aumento foi cerca de 11% e para 120 µm foi de 25%. A curva de amplitude das alturas do perfil (à direita na Figura) indica uma significativa quantidade de profundidades de até 150 µm. Mas, isso ocorre porque o gráfico gerado para esta textura foca na região de fim de passe do sulco. Nas Figuras 4.4 e 4.5 isso não ocorre justamente por ter sido avaliada uma região que abrange bem além do fim dos *grooves*.

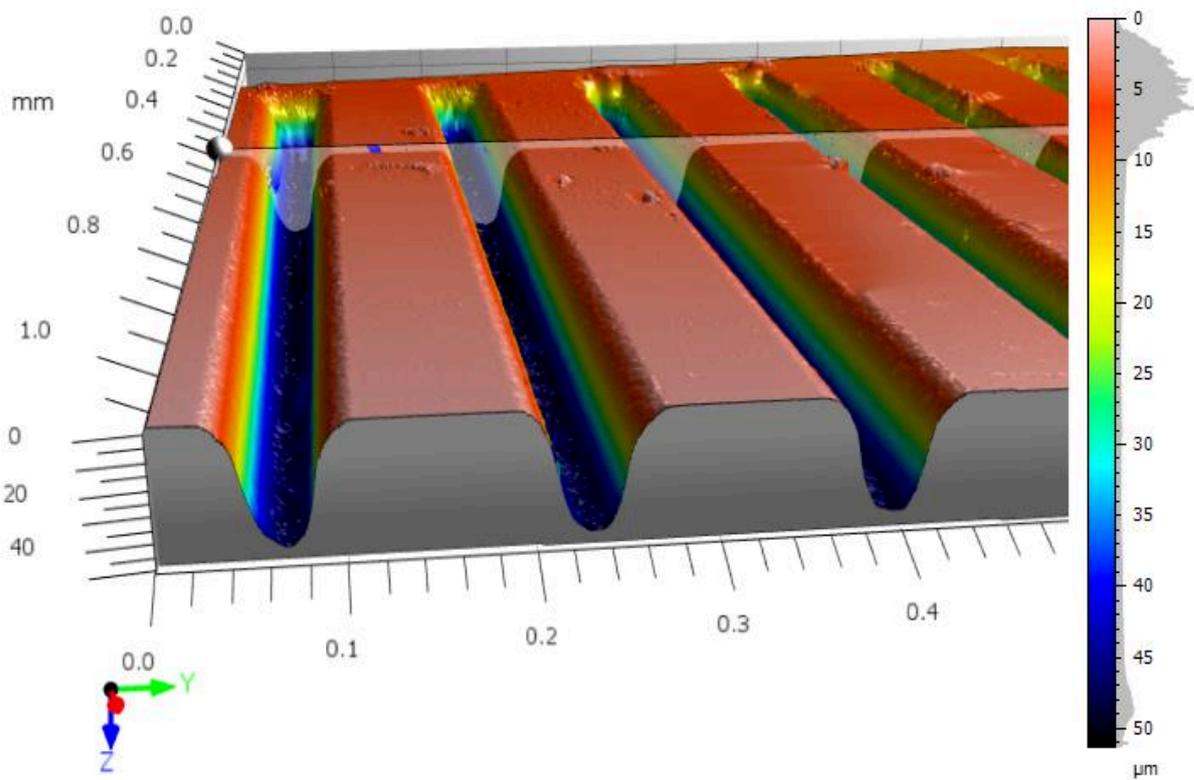


Figura 4.4 – Gráfico 3D da perfilometria de uma textura de dimensões 45  $\mu\text{m}$ . Vista 1.

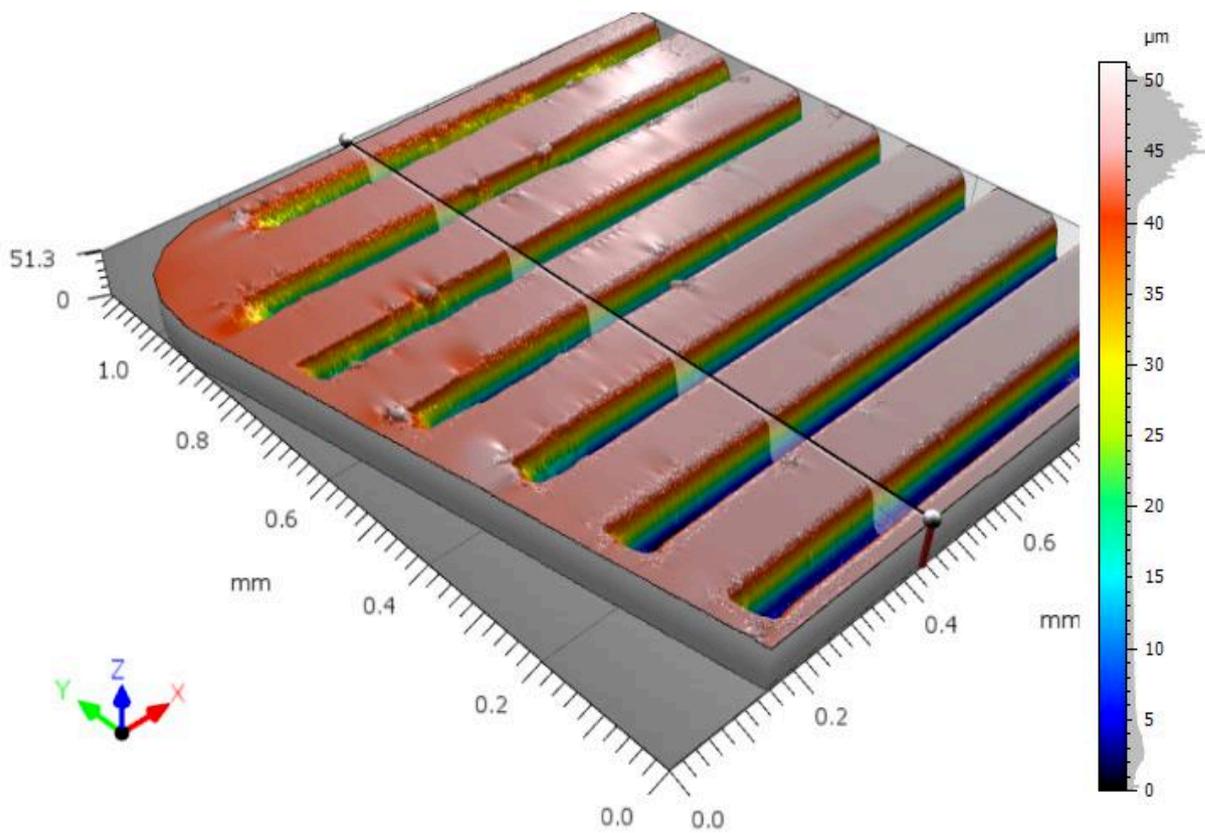


Figura 4.5 – Gráfico 3D da perfilometria de uma textura de dimensões 45  $\mu\text{m}$ . Vista 2.

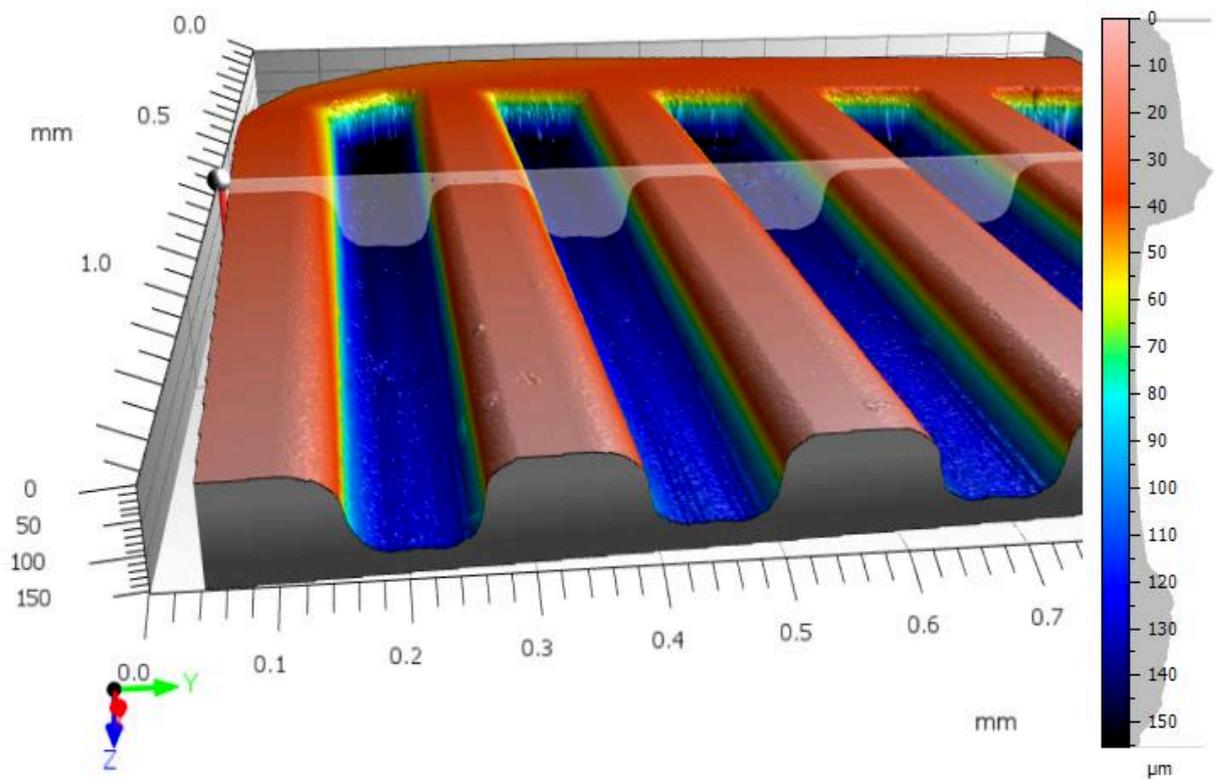


Figura 4.6 – Gráfico 3D da perfilometria de uma textura de dimensões 120  $\mu\text{m}$ . Vista 1.

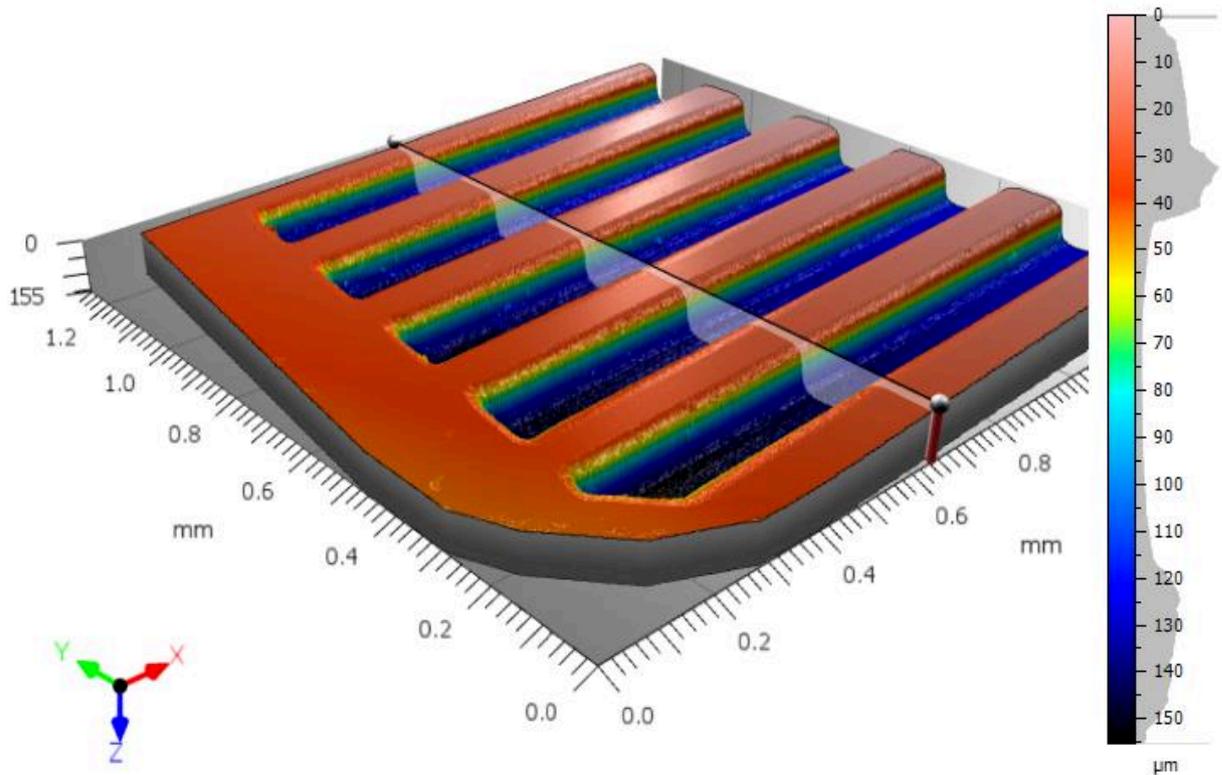


Figura 4.7 – Gráfico 3D da perfilometria de uma textura de dimensões 120  $\mu\text{m}$ . Vista 2.

## 4.2 Texturas Pós-testes

Mesmo antes da análise de resultados, durante a execução dos testes, já foi possível notar que o parâmetro direção das texturas teve uma enorme influência. A grande maioria das ferramentas de corte com texturas com direção paralela à aresta de corte quebrou próximo da aresta de corte, e as perpendiculares produziram menos ruídos durante o torneamento do que as ferramentas lisas. Essas de quebras de ferramentas ocorridas divergem das conclusões do trabalho de revisão desenvolvido por Gajrani e Sankar (2017), em que afirmam que texturas não impactam na resistência mecânica das ferramentas de corte. Há uma clara correlação entre os parâmetros envolvidos como dureza e ductilidade do material, resistência da ferramenta e as dimensões das texturas.

Como visto na literatura, o trabalho dos autores Dhage, Jayal e Sarkar (2019) especificam que tribologicamente a melhor direção para uma textura *groove* linear é perpendicular ao fluxo de cavacos (paralelas à aresta de corte), pois este tipo de textura reduz a área de contato entre o cavaco e a ferramenta. Eles justificam que, em casos de texturas *grooves* perpendiculares à aresta de corte, o cavaco pode entupir a textura e gerar contato. Entretanto, esses autores trabalharam com aço carbono, que não é tão dúctil como o alumínio. Vários autores que concordam com Dhage, Jayal e Sarkar (2019) também trabalharam com materiais não demasiadamente dúcteis: Chen et al. (2019), Arulkirubakaran et al. (2019), Kumar e Patel (2018) e Grguraš e Pusavec (2019).

Por outro lado, autores que trabalharam com alumínio, como o caso de Kang et al. (2018-A), encontraram que a direção de textura *groove* perpendicular à aresta de corte gera melhores resultados (menores forças de corte e efeito de adesão) do que quando paralelos à aresta de corte. No presente estudo os resultados aqui encontrados corroboram com os resultados encontrados por Kang et al. (2018-A).

O problema da usinagem do alumínio com texturas paralelas à aresta de corte foi o empastamento do alumínio dentro das texturas, que geraram grandes esforços nas superfícies das texturas. Isso ocorre pois o atrito entre o alumínio estagnado dentro da textura com os cavacos em formação gera grandes esforços. Tal efeito ficou mais evidente nas texturas sem lubrificante, paralelas à aresta de corte e de dimensões maiores. No caso das texturas paralelas à aresta de corte o efeito de ancoramento do material na ferramenta de corte é acentuado, o que leva ao surgimento de trincas. No caso de texturas com maiores dimensões, estas passam se comportar como acumuladores de tensão na estrutura da ferramenta de corte, agravando o problema de geração de trincas na ferramenta. Mas mesmo nas texturas de dimensões

menores (Tipo PA45), também se formou algumas trincas para maiores velocidade de cortes (ver Figura 4.8).

A utilização de lubrificante sólido reduziu a estagnação e aderência do alumínio dentro das texturas. A Figura 4.8 permite a comparação entre a presença e ausência do  $\text{MoS}_2$  para todos os tipos de texturas (todas as arestas da figura foram utilizadas na mesma condição de corte, com velocidade de corte de 400 m/min). Nota-se a evidente presença do alumínio, que se destaca pela sua coloração típica. No restante da textura é possível ver restos de lubrificante sólido (com seu selante de silicone) e também resquícios de tinta preta (como visto no tópico 3.4.3)

O efeito de a lubrificação evitar a adesão do material dentro da textura, fica mais bem evidenciado no tópico de resultados de temperatura (4.5), pois a redução do atrito impacta diretamente na temperatura de corte.

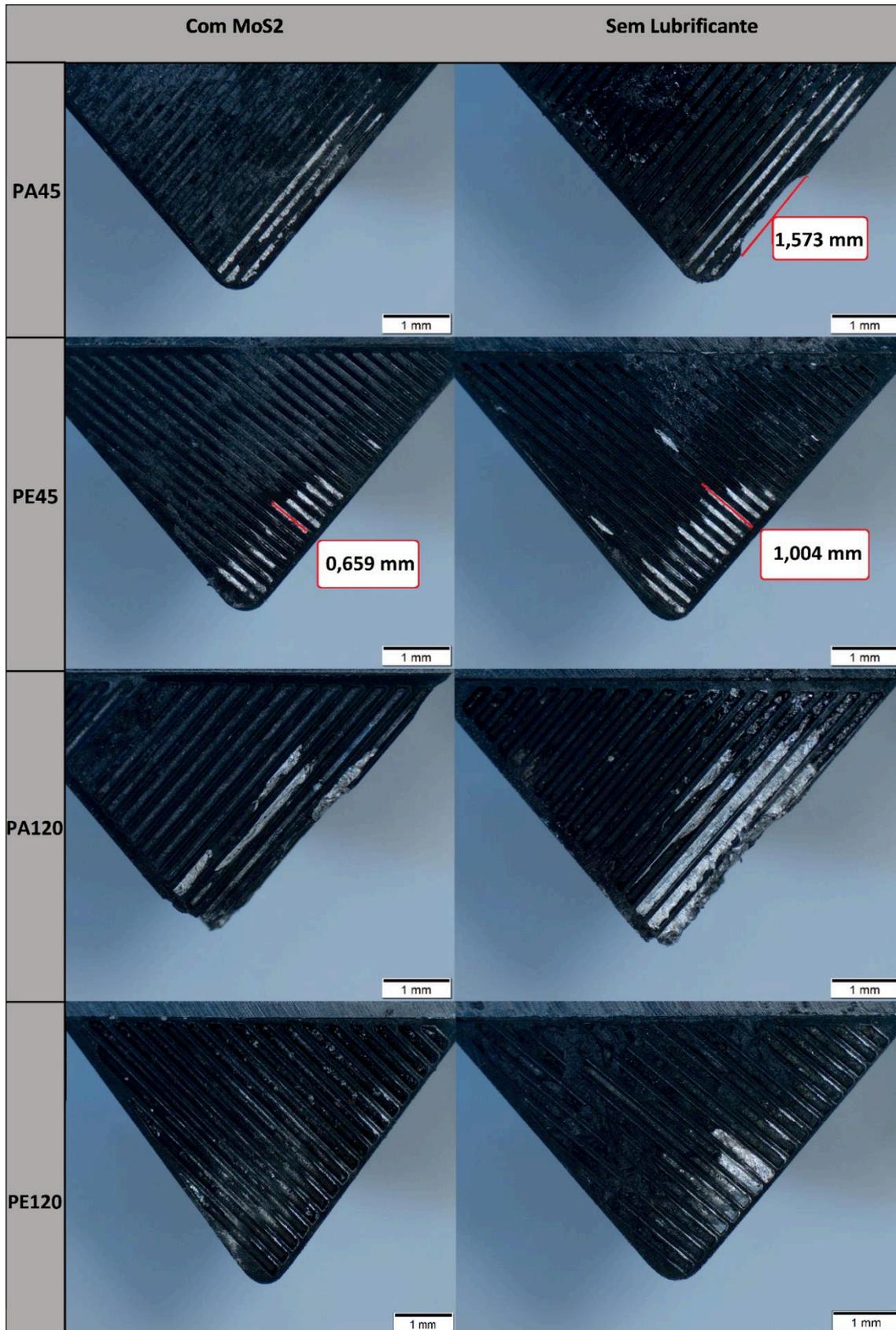


Figura 4.8 – Superfície de saída das ferramentas após usinagem. Observa-se acúmulo de alumínio e a presença e ausência de lubrificante para todos os tipos de texturas.  $v_c = 400$  m/min.

### 4.3 Morfologias dos Cavacos

Um dos resultados mais notórios na utilização das ferramentas texturizadas foi a alteração na forma dos cavacos gerados. As ferramentas lisas (sem texturas) geraram cavacos helicoidais tubulares curtos, exemplificados pelo formato 2-2 da Figura 4.9, e uma amostra desse cavaco pode ser visualizada na Figura 4.10 à esquerda. As ferramentas texturizadas geraram cavacos na forma de arcos soltos, exemplificados pelo formato 6-2 da Figura 4.9, e uma amostra desse cavaco pode ser visualizada na Figura 4.10 à direita. Será discutido mais à frente que os cavacos soltos favorecem a dissipação de calor e a usinagem.

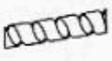
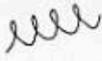
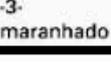
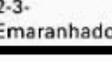
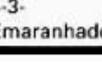
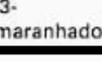
1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco helicoidal tipo arruela	5- Cavaco helicoidal cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conectado		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			
							

Figura 4.9 – Formas de cavacos. Fonte: ISO 3685 (1993).



Figura 4.10 – Exemplares típicos dos cavacos gerados. À esquerda por uma ferramenta de corte sem textura e à direita por uma ferramenta de corte com textura.

Na Figura 4.11 pode-se ver amostras de cavacos gerados pelas ferramentas texturizadas, de todos os 4 tipos. Nota-se que, apesar de pequenas diferenças, os cavacos oriundos de ferramentas texturizadas são relativamente muito parecidos entre si, mas, bem diferentes dos cavacos obtidos na usinagem com ferramentas sem texturização. Porém, houve casos em que ocorreu quebra na placa de PCD das ferramentas com texturas *grooves* paralelos à aresta de corte (tipos PA45 e principalmente PA120), e nesses casos também houve produção de alguns cavacos helicoidais tubulares curtos.



Figura 4.11 – Amostra de cavacos gerados por ferramentas com todos os tipos de texturas.

Na Figura 4.12 é possível associar as dimensões de espessura e largura dos cavacos com os parâmetros de corte aplicados de avanço e profundidade de corte, respectivamente. Também é possível notar as deformações no cavaco causado pelas texturas.

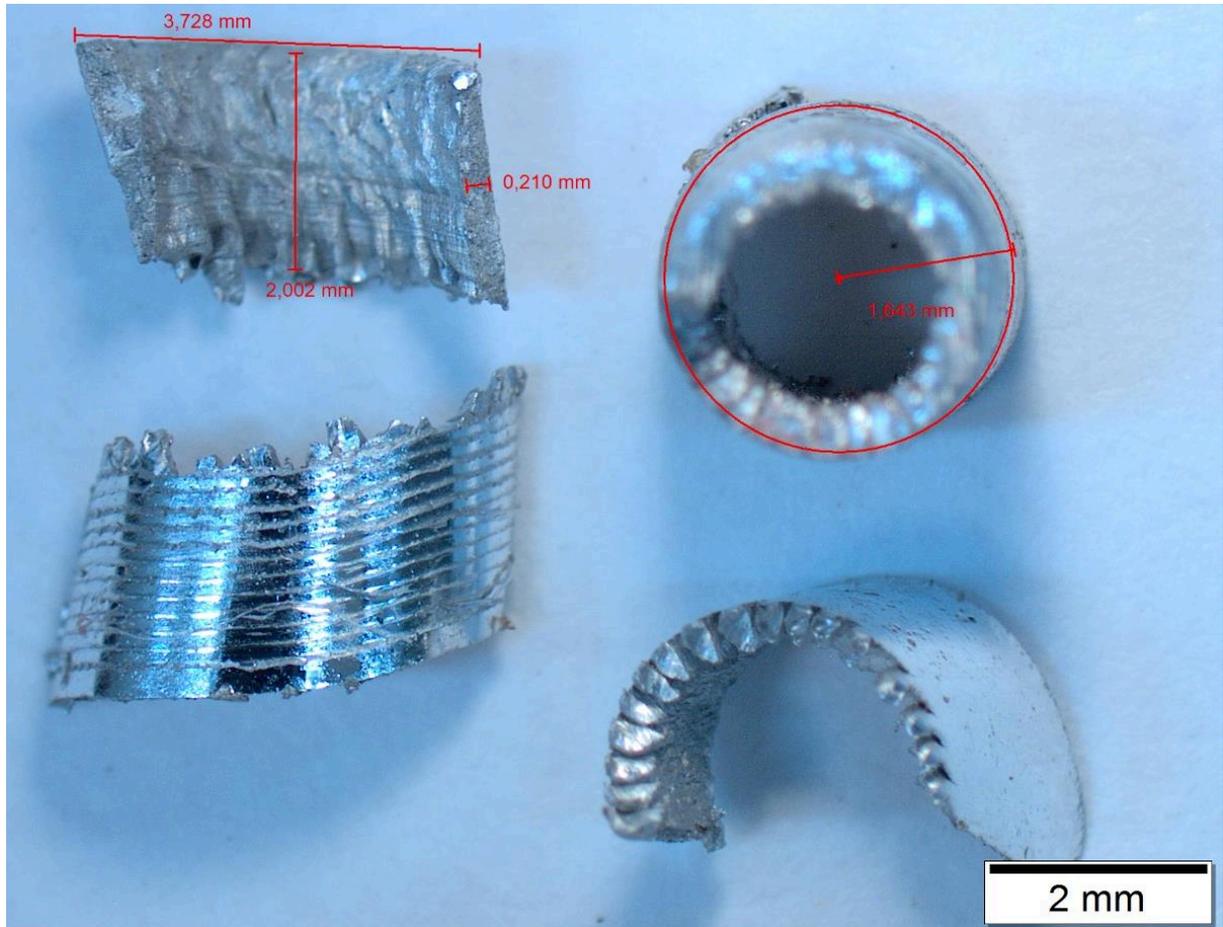


Figura 4.12 – Dimensões típicas dos cavacos oriundos de ferramentas texturizadas.

Essas saliências paralelas ao comprimento do cavaco foram geradas por texturas paralelas ou fluxo de cavaco, ou seja, perpendiculares à aresta de corte (tipos PE45 e PE120). A Figura 4.13 mostra um cavaco gerado pela ferramenta texturizada PE120. As texturas paralelas à aresta de corte também geraram marcas na superfície inferior dos cavacos (aquele que teve contato com a superfície de saída da ferramenta), caracterizando um aspecto mais áspero e com marcas similares a estrias (Figura 4.14), enquanto os cavacos tubulares gerados pelas ferramentas sem textura apresentaram a superfície inferior menos áspera (Figura 4.15). Na Figura 4.16 são apresentadas imagens obtidas no MEV das superfícies inferiores desses três cavacos citados, facilitando a comparação entre eles.

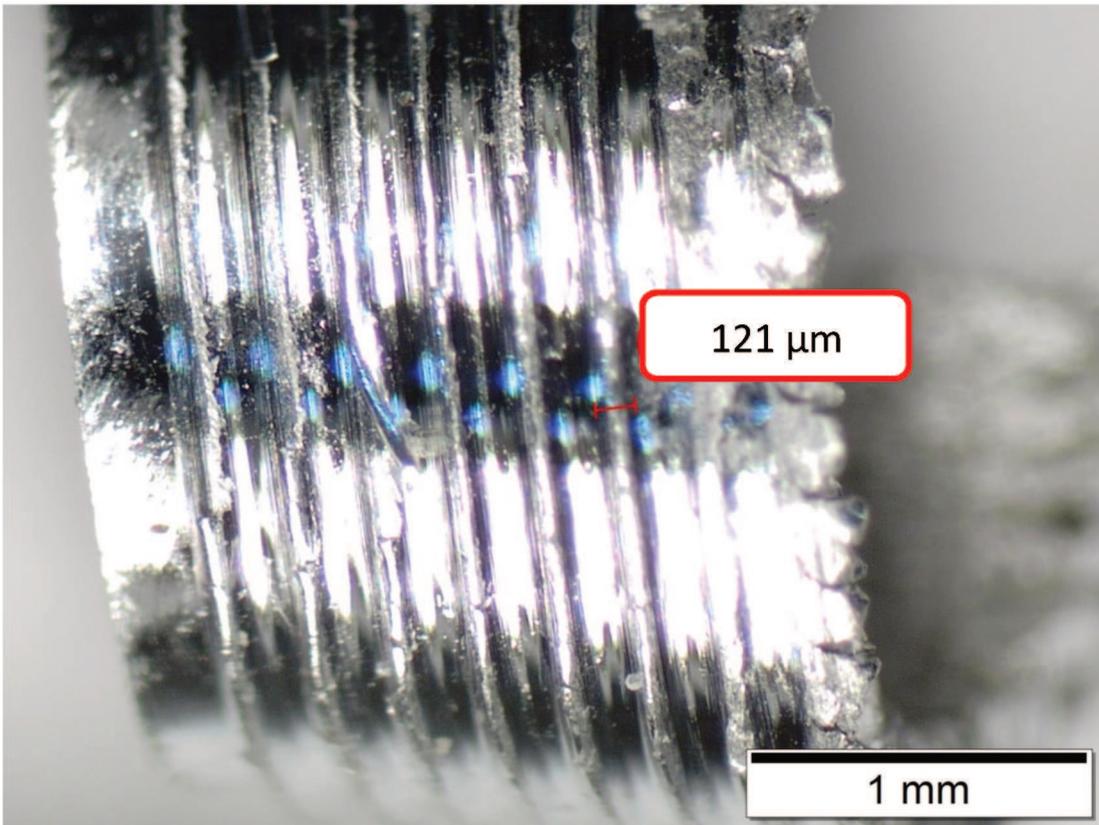


Figura 4.13 – Cavaco deformado pela textura perpendicular à aresta de corte (tipo PE120)

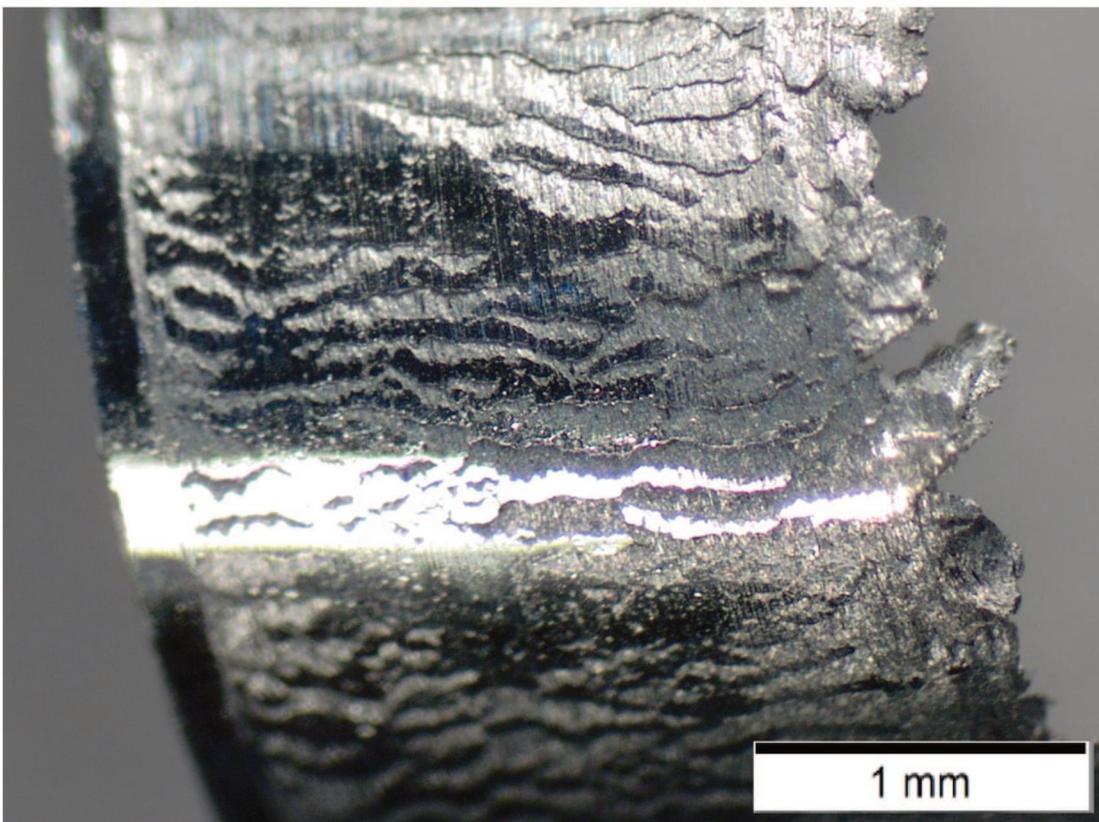


Figura 4.14 – Cavaco deformado pela textura paralela à aresta de corte (tipo PA45)

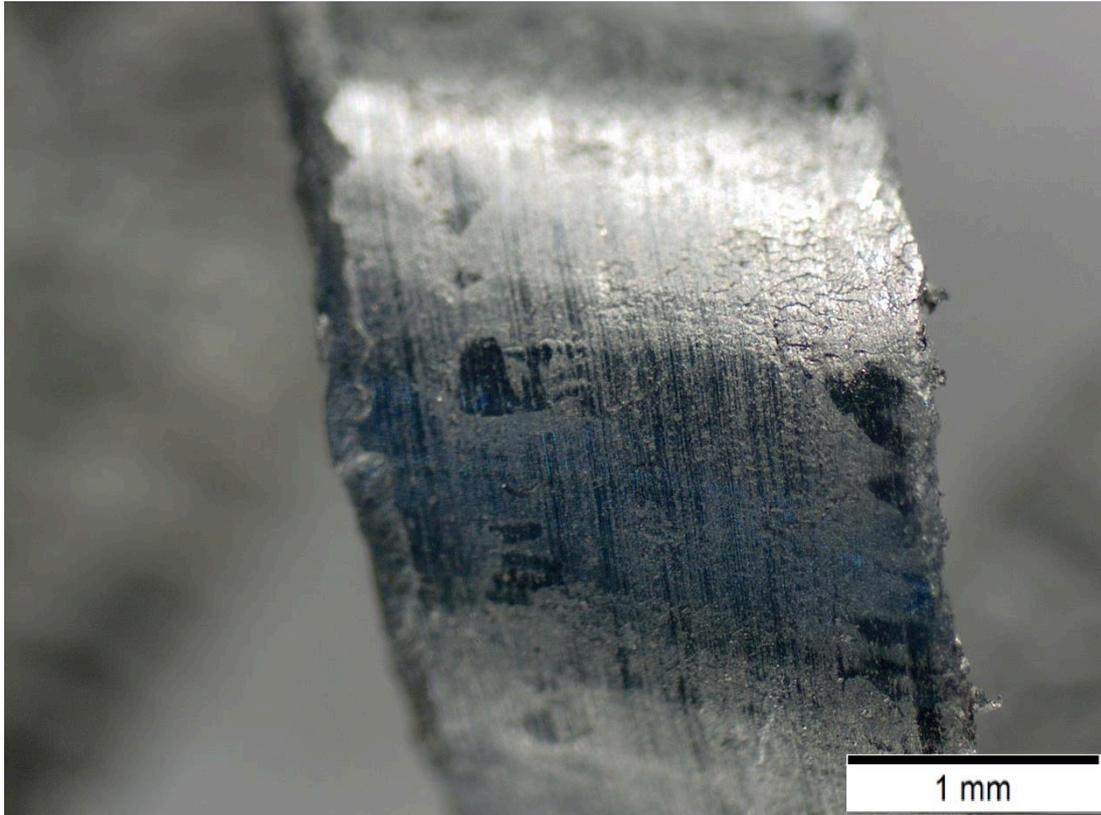


Figura 4.15 – Cavaco tubular curto, com sua superfície externa lisa.

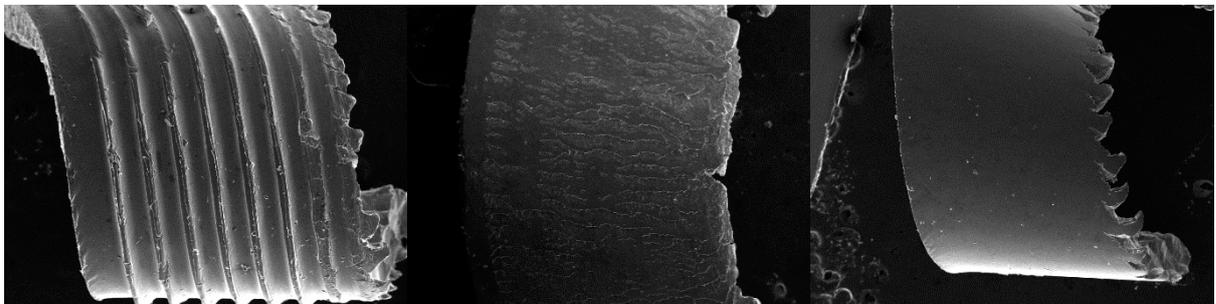


Figura 4.16 – Comparação das superfícies inferiores dos cavacos gerados em imagens de MEV em Mag = 100x. Da esquerda pra direita, tipos PE120, PA45 e Lisa.

Esse comportamento ocorre durante a usinagem de materiais de alta ductilidade como o alumínio. Em trabalhos como de Sugihara, Nishmoto e Enomoto (2017-B), em que foi torneado Inconel 718 (um material de alta dureza), mesmo que o torneamento também tenha sido realizado com texturas do tipo *groove*, o cavaco não se deformou junto às texturas.

Tal característica do alumínio altera toda a dinâmica de atuação das texturas, em comparação ao efeito das texturas na usinagem de materiais duros e menos dúcteis. No caso de usinagem de materiais pobres condutores, como ligas de titânio e níquel (acima da

velocidade crítica) a classe dos cavacos formados é segmentada, explicada pela teoria da iniciação de fratura periódica (Komanduri et al., 1982) e pela teoria do cisalhamento adiabático (Vyas e Shaw, 1999). No caso aqui estudado, as classes dos cavacos formados são contínuos ou parcialmente contínuos, típicos de materiais dúcteis, sofrendo influências das condições de corte e da alta taxa de deformação que o cavaco sofre pelas texturas. Tal fenômeno promove o encruamento e deixa o cavaco mais duro e quebradiço. Com o intuito de investigar tal comportamento, ensaios de dureza foram realizados nos cavacos, seguindo a mesma metodologia aplicada para os ensaios de dureza nas amostras de alumínio.

Nos cavacos helicoidais tubulares, gerados pelas ferramentas lisas, a microdureza média encontrada foi de 102 HV 0,05, bem próximas à dureza da peça de alumínio (99 HV 0,05). Por outro lado, os cavacos e arcos soltos gerados pelas ferramentas texturizadas tiveram durezas significativamente maiores, sendo, em média, 119 HV 0,05 para os cavacos das texturas tipo PA45, 122 HV 0,05 para o tipo PE45, e 131 HV 0,05 para o tipo PE120 (cavaco com maiores deformações), confirmando o significativo encruamento. Devido ao trincamento de todas as arestas de corte do tipo PA120, os cavacos gerados nesse tipo não apresentaram nenhum padrão e por tanto não puderam ser analisados.

Também foi realizada metalografia dos cavacos, com objetivo de confirmar a alteração da microestrutura dos mesmos para a comparação dos cavacos de ferramentas texturizadas e não texturizadas. As micrografias de todos os cavacos apresentados a seguir foram resultados do ataque do mesmo reagente: solução de Kroll. A Figura 4.17 apresenta a micrografia de um cavaco gerado por uma ferramenta sem textura, que é muito similar à microestrutura das amostras de alumínio, como encontrados na [Figura 3.3, tópico 3.2]. As Figuras 4.18 e 4.19 mostram as micrografias de cavacos gerados pelas texturas PA45 e PE120, respectivamente. Essas metalografias se mostram muito parecidas entre si, mesmo sendo texturas de dimensões e orientações opostas, mas ambas são muito diferentes em relação às amostras de alumínio e também do cavaco helicoidal tubular. As metalografias dos cavacos de ferramentas texturizadas apresentam grãos alongados e comprimidos entre si, típicos de material que sofreu uma maior deformação plástica e encruamento. Estas figuras mostram também que essas amostras de cavacos são da classe contínua.

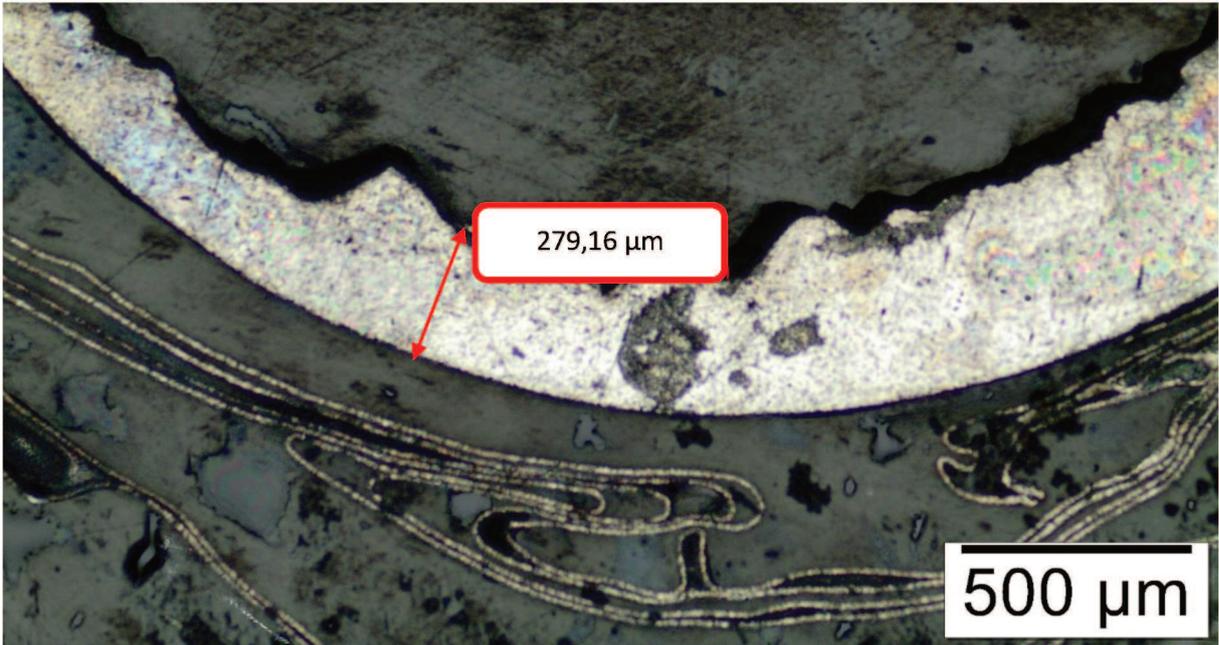


Figura 4.17 – Metalografia de um cavaco originado por ferramenta sem textura, atacado com solução de Kroll.



Figura 4.18 – Metalografia de um cavaco originado pela textura tipo PA45, atacado com solução de Kroll.

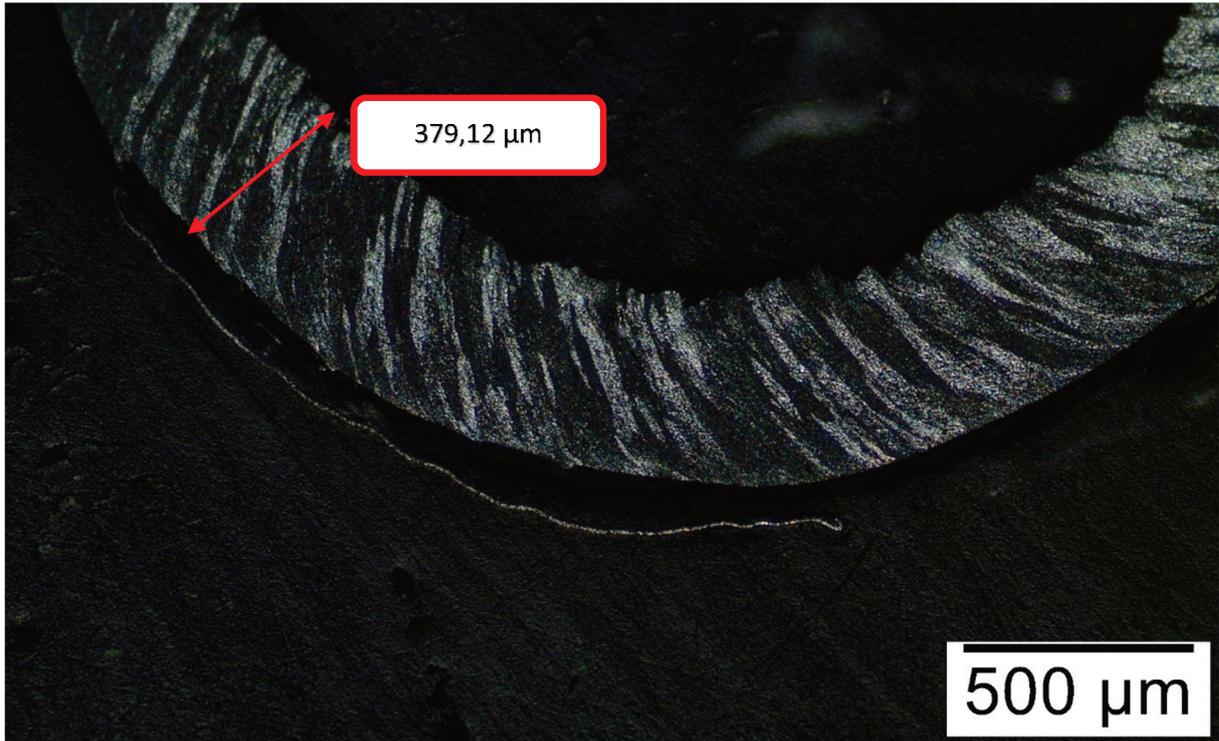


Figura 4.19 – Metalografia de um cavaco originado pela textura tipo PE120, atacado com solução de Kroll.

A fim de ilustrar o tipo de fratura ocorrido na quebra de ambas as formas de cavacos, as Figuras 4.20 e 4.21 apresentam vistas das seções transversais desses cavacos. Na Figura 4.20 tem-se uma vista da região onde ocorreu o cisalhamento e a fratura do cavaco helicoidal tubular. Nota-se uma clara aspereza em toda a superfície, comportamento típico de um material dúctil como o Alumínio. Por outro lado, na Figura 4.21, a vista é de um cavaco na forma de arco solto, gerado por ferramenta com textura tipo PE120 e com dureza cerca de 30% maior. Nesse último inclusive é possível notar a deformação da textura na parte superior do cavaco. Aqui a fratura ainda é dúctil, mas claramente menos, com pequenas regiões relativamente lisas.

A junção desses fatos indica que as texturas são capazes de endurecer os cavacos de alumínio, tornando-os menos dúcteis e mais propensos a se formar cavacos mais curtos, e tal observação encontra-se de acordo com os resultados de Vasumathy e Meena (2017) e Duan et al. (2019), em que ambos concluíram que texturas tipo *grooves* lineares favorecem a frequência e grau de serrilhamento do cavaco gerado.

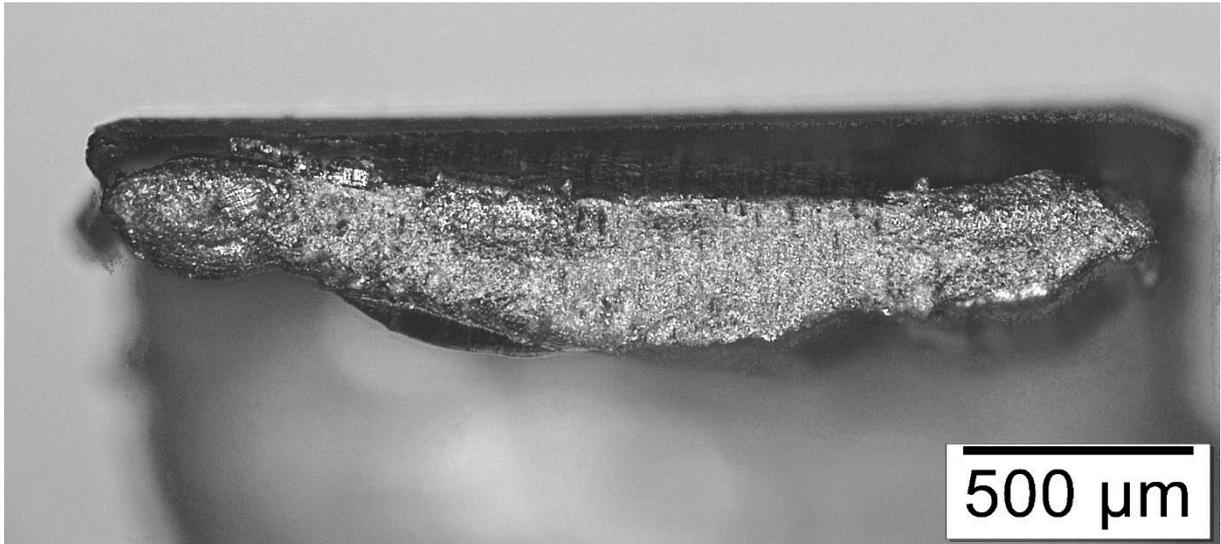


Figura 4.20 – Fratura de um cavaco oriundo de ferramenta sem textura.

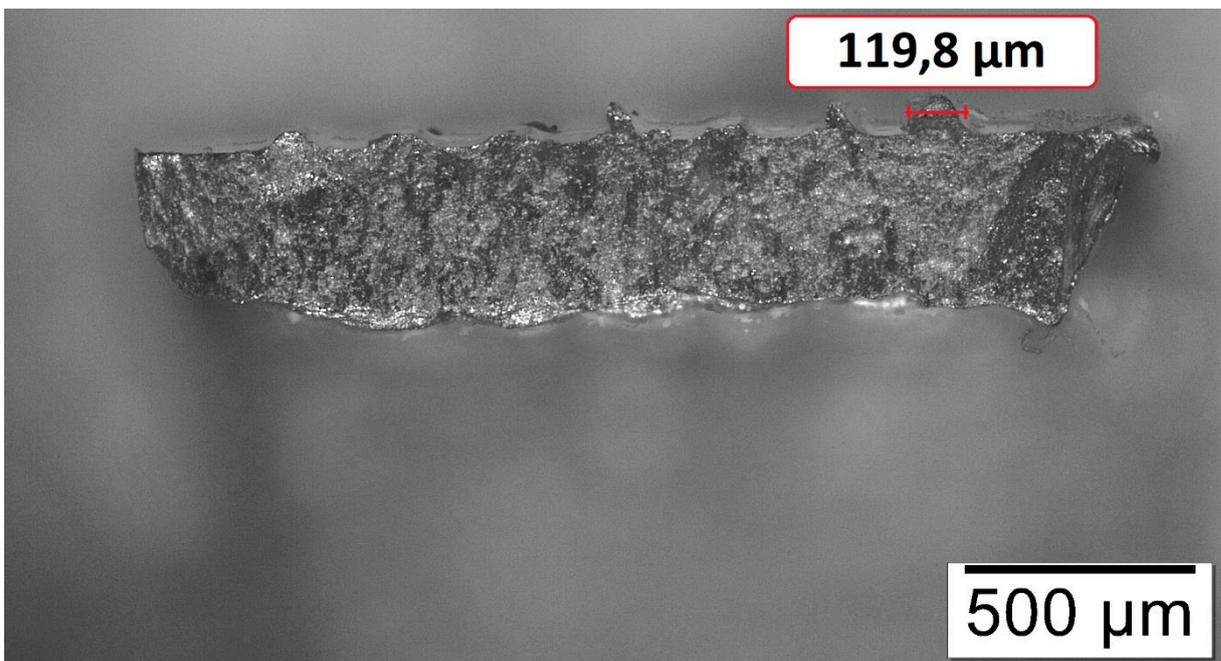


Figura 4.21 – Fratura de um cavaco oriundo de ferramenta com textura (tipo PE120).

#### 4.4 Forças de Usinagem

Devido ao ângulo de posição próximo de  $90^\circ$ , a força passiva obtida foi muito pequena em todos os casos, e não apresentou variações significativas, sendo desconsideradas na análise. Como visto em estudos de torneamento de alumínio, como no trabalho de Schuitek et al. (1997), que usinou o alumínio da série 2011, a força passiva foi sempre menor que a força de avanço, e nos casos em que a força de avanço é muito pequena, a força passiva é

praticamente zero. A angulação do suporte da ferramenta também induz a supressão da força passiva no corte.

O Quadro 4.1, juntamente com a Figura 4.22, orientam as análises aqui feitas. No Quadro 4.1, as forças representadas são as médias obtidas através dos três ensaios realizados para cada condição. O percentual denominado “variação” é o quanto a textura melhorou ou piorou os esforços em relação às ferramentas sem texturas (condições 9 e 10). Como se pode observar neste quadro, a força de avanço também apresentou valores muito baixos em alguns casos e, conseqüentemente, pequenas alterações nos valores acarretaram grandes variações percentuais. Isso indica possíveis problemas na aquisição dessa variável de saída, sendo, portanto, desconsideradas para análise. Logo, com as forças de avanço e passiva sendo desconsideradas, a força de corte será a referência para a comparação dos testes, embora a força de usinagem também tenha sido apresentada.

Na Figura 4.22, têm-se os gráficos das forças no decorrer de apenas um ensaio para cada uma das condições estudadas. Contudo, esses gráficos também possibilitam uma correlação com os resultados apresentados no Quadro 4.1. Esta figura também é importante para as análises de rugosidade, pois a variação/oscilação da força no decorrer da aquisição evidencia a vibração ocorrida no corte, fenômeno o qual é um forte influenciador nos resultados de rugosidade da peça torneada.

Condição	Tipo de Textura	Vc [m/min]	Preenchimento da Textura	Força de Corte		Força de Avanço		Força de Usinagem	
				Média [N]	Variação [%]	Média [N]	Variação [%]	Média [N]	Variação [%]
1	PA45	400	Seco	249.60	6.49	164.73	583.89	299.06	26.92
2	PE45	400	Lubrificado	219.09	-6.53	0.61	-97.48	219.09	-7.02
3	PA120	400	Lubrificado	418.03	78.35	778.76	3133.16	883.87	275.11
4	PE120	400	Seco	229.66	-2.02	42.59	76.81	233.57	-0.87
5	PA45	200	Lubrificado	211.46	-0.84	29.25	164.98	213.47	-0.03
6	PE45	200	Seco	212.32	-0.44	0.65	-94.09	212.32	-0.57
7	PA120	200	Seco	402.23	88.62	680.10	6061.82	790.14	270.02
8	PE120	200	Lubrificado	205.13	-3.81	43.02	289.79	209.59	-1.85
9	Lisa	400	-	234.39	-	24.09	-	235.63	-
10	Lisa	200	-	213.25	-	11.04	-	213.54	-

Quadro 4.1 – Médias das forças obtidas nos ensaios.



Figura 4.22 – Comportamento das componentes da força de usinagem em função do tempo de usinagem para todas as condições ensaiadas.

Na maioria das condições estudadas, a força de corte predominou, sendo a de maior módulo, com exceção dos testes número 3 (textura PA120, velocidade de corte de 400 m/min, lubrificado) e número 7 (textura PA120, velocidade de corte de 200 m/min, seco), onde a componente de avanço apresentou o maior módulo. Estes resultados são consequência das quebras das arestas de corte (ver Figura 4.8), mas com fortes indícios de ter também ocorrido maior restrição ao escorregamento do cavaco na direção da saída da ferramenta (direção do avanço), imposta pela textura paralela à aresta de corte mais robusta (dimensão de 120  $\mu\text{m}$ ), mesmo com lubrificação.

Nos ensaios com as ferramentas com texturas dos tipos PA45 e PA120 houve, em alguns casos, a adversidade de quebra de arestas, já citadas anteriormente. Nos gráficos das forças de corte ao longo do tempo (Figura 4.22), é possível notar que a quebra da aresta de corte nas texturas tipo PA120 ocorreram logo ao início do torneamento (testes 3 e 7), enquanto no caso da textura PA45 (condição do teste 1, com  $v_c = 400$  m/min, sem lubrificante) a aresta foi quebrando no decorrer do ensaio. Como comentado, essas falhas impactaram fortemente na força de avanço, resultando em uma expressiva piora na usinagem.

Houve casos, como na condição 5 (com textura tipo PA45 e  $v_c = 200$  m/min, lubrificado), em que apesar de um aumento da força de avanço em 164%, a força de usinagem ainda permaneceu inferior à uma ferramenta lisa, pois mesmo com o aumento, a parcela da força de avanço é relativamente pequena, comparada à força de corte (e esta última ainda teve uma redução). Portanto, nota-se que as texturas têm grande influência na força de avanço, mas, esta componente representa apenas uma pequena parcela da força de usinagem. Logo, as menores variações nas forças de corte são que determinam os efeitos das texturas na força de usinagem.

Todas as texturas tipo PA120 a seco e lubrificada e as texturas tipo PA45 sem lubrificação mostraram aumento nas forças de usinagem. Enquanto os demais tipos de texturas reduziram as forças de corte, mesmo que em alguns casos fossem reduções mínimas. A redução mais impactante foi para a condição 2 com mais de 7% (textura PE45 com lubrificante, com  $v_c = 400$  m/min). Tal resultado é similar ao trabalho de Kang et al. (2018-A) que também tornearam alumínio com ferramentas com vários tipos de texturas e obtiveram uma redução mais eficiente na força de corte para as texturas perpendiculares à aresta de corte. Rathod et al. (2016) também usinaram alumínio e ainda aplicaram  $\text{MoS}_2$  nas texturas *grooves*, e encontraram reduções de força de usinagem em quase 20% com *grooves* lineares. Neste caso a eficiência pode ter sido maior devido à maior velocidade de corte utilizada (500 m/min), pois os próprios autores encontram uma correlação em que maiores velocidade

resultam em maiores reduções nas forças (mas que após 300 m/min, o aumento da velocidade começa a favorecer cada vez menos na redução da força).

A Tabela 4.1 mostra a análise da variância (Anova) dos resultados da força de corte, considerando todas as variáveis das condições dos ensaios. Nota-se que os parâmetros de direção e dimensão das texturas são considerados significativos (valor-p < 0,05) para a força de usinagem, com um índice de confiabilidade de 95%. Na Figura 4.23, tem-se do diagrama de Pareto das variáveis sobre a força de usinagem.

Tabela 4.1 – Análise da variância para a Força de Corte.

Fator	S.Q	G.L	F	Valor-p
Direção da Textura	64622	1	25,75289	-0,000067
Dimensões	49297	1	19,64566	-0,000286
Velocidade de Corte	2724	1	1,08587	0,310466
Condição de Lubrificação	602	1	0,24016	0,629634
Erro	47677	1		
Total S.Q.	164925	5		

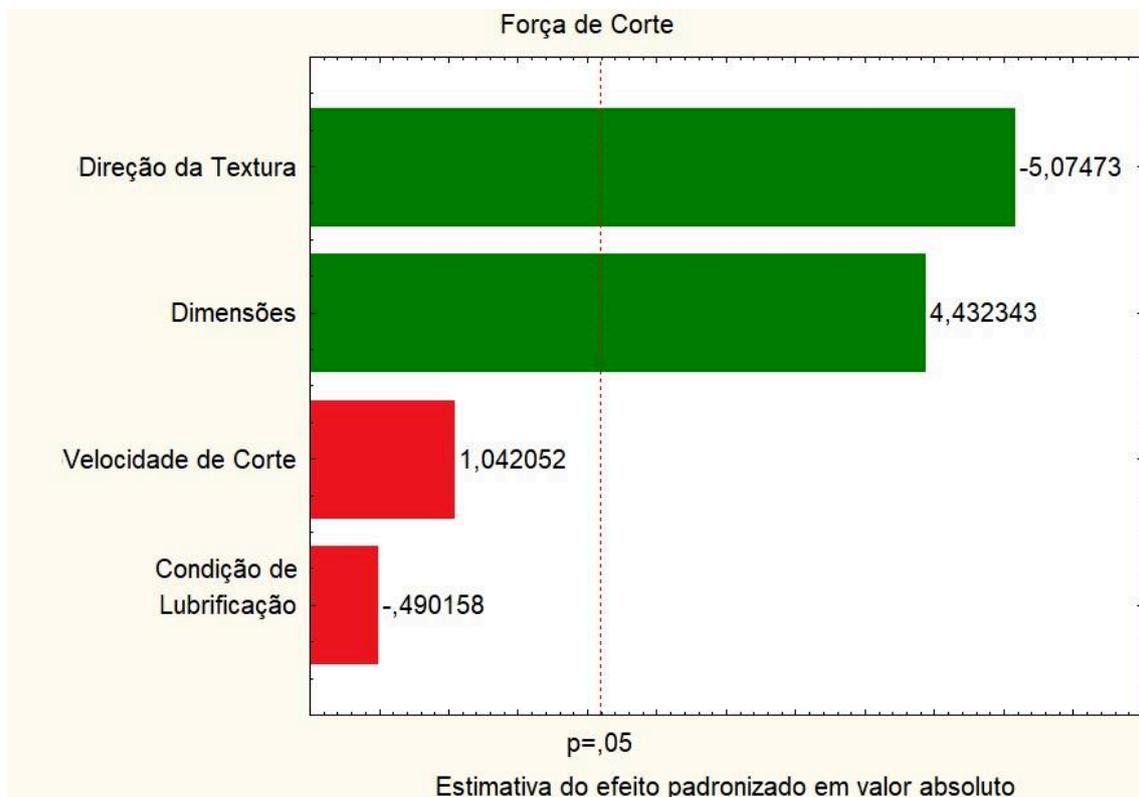


Figura 4.23 – Diagrama de Pareto mostrando a influência das variáveis de entrada estudadas sobre a força de corte considerando todas as condições de ensaios.

Pelo diagrama de Pareto, conclui-se que a direção da textura é o maior responsável pela variação na força de usinagem. Isso era de se esperar devido às adversidades já discutidas no tópico 4.2, em que texturas paralelas à aresta de corte tendem a estagnar material e gerar uma área de contato com maior atrito no corte. Na textura da condição 5, mesmo sendo o caso de uma textura tipo PA45, que é paralela à aresta de corte, seus resultados não mostraram tal problema de estagnação de alumínio. Isto ocorreu, pois a textura tem menores dimensões e ainda conta com a presença de lubrificante, além disso, a velocidade de corte foi a mais baixa estudada.

Em segundo lugar se apresentam as dimensões das texturas como mais influentes. Estes resultados se justificam pelas trincas ocorridas em todas as texturas do tipo PA120 que acabaram gerando forças de cortes excessivamente altas e, conseqüentemente, influenciaram na avaliação. Para eliminar esta influência, foi realizado mais um diagrama de Pareto, desta vez descartando as texturas tipo PA120 (Figura 4.24).

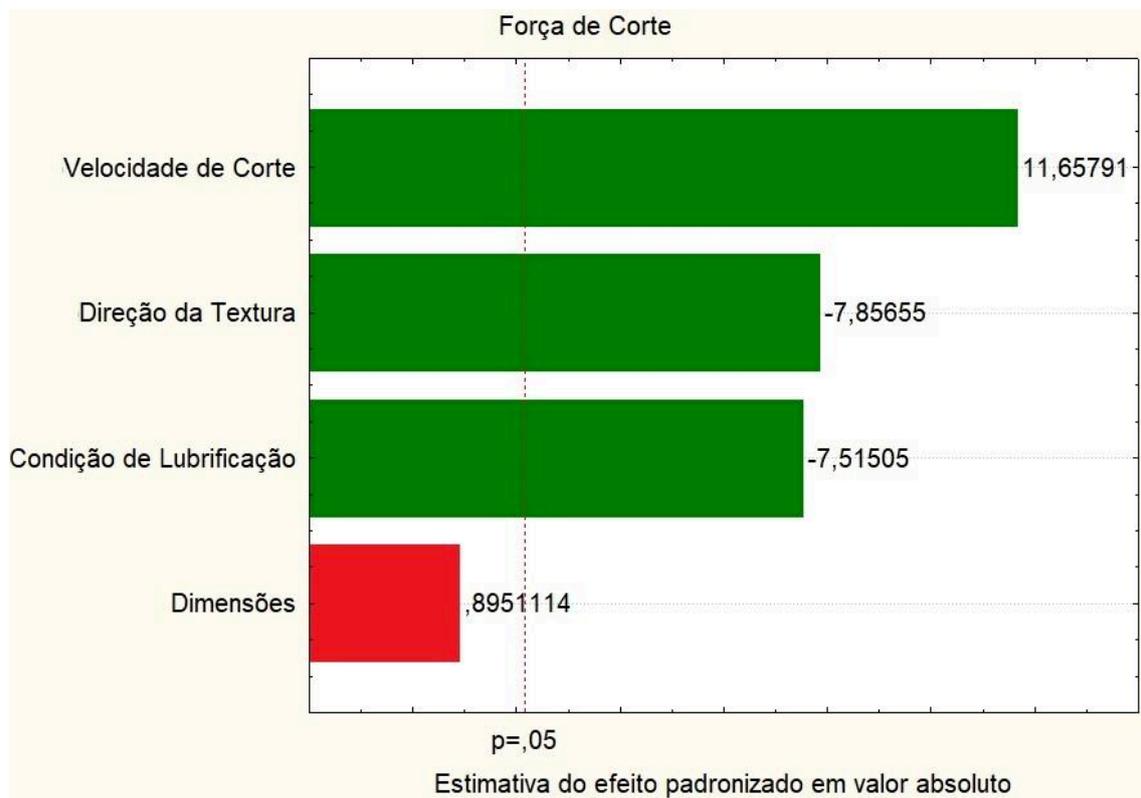


Figura 4.24 – Diagrama de Pareto mostrando a influência das variáveis estudadas sobre a força de Corte, excluindo os ensaios de texturas do tipo PA120.

Nesse novo diagrama, têm-se diferentes variáveis sendo consideradas significantes para a força de usinagem. A velocidade de corte que antes não se mostrou significativa, agora aparece como o mais influente, o que já é de se esperar. Para velocidades de corte muito baixas na usinagem do alumínio, a baixa temperatura de trabalho acaba por dificultar o corte, mas, para altas velocidades como as utilizadas nesse estudo (200 e 400 m/min), tal fenômeno não ocorre. Sobre os parâmetros influentes, o gráfico da Figura 4.24 indica também, através dos sinais (positivos ou negativos), qual das duas opções em cada parâmetro ocorre o aprimoramento dos resultados de força. Neste caso, temos que as menores forças ocorrem para:

- a velocidade de corte: 200 m/min.
- a direção da textura: perpendicular à aresta de corte;
- a condição de lubrificação: com MoS<sub>2</sub>;

Nesta nova configuração de Pareto, as dimensões das texturas não se mostraram influentes. Tal observação já havia sido feita no trabalho de Patel, Shah e Ozel (2019) e Mishra, Ghosh e Aravindan (2018-A), cujo estudo indicou que aumentar a profundidade das texturas não é eficiente, em se tratando de forças de usinagem. Inclusive a profundidade, quando excessiva, pode até mesmo aumentar as forças de corte (Patel et al., 2020).

Sobre a influência do lubrificante, a Figura 4.25 apresenta uma análise mais clara. No gráfico pode-se notar que a presença do lubrificante dentro das texturas traz uma redução nas forças de usinagem para ambas as dimensões de texturas. Tal resultado encontra-se de acordo como os estudos de Feng et al. (2017) e Orra e Choudhury (2018), em que esse último inclusive concorda que o lubrificante sólido atua melhor na redução de força quando aplicado em *grooves* na direção perpendicular à aresta de corte.

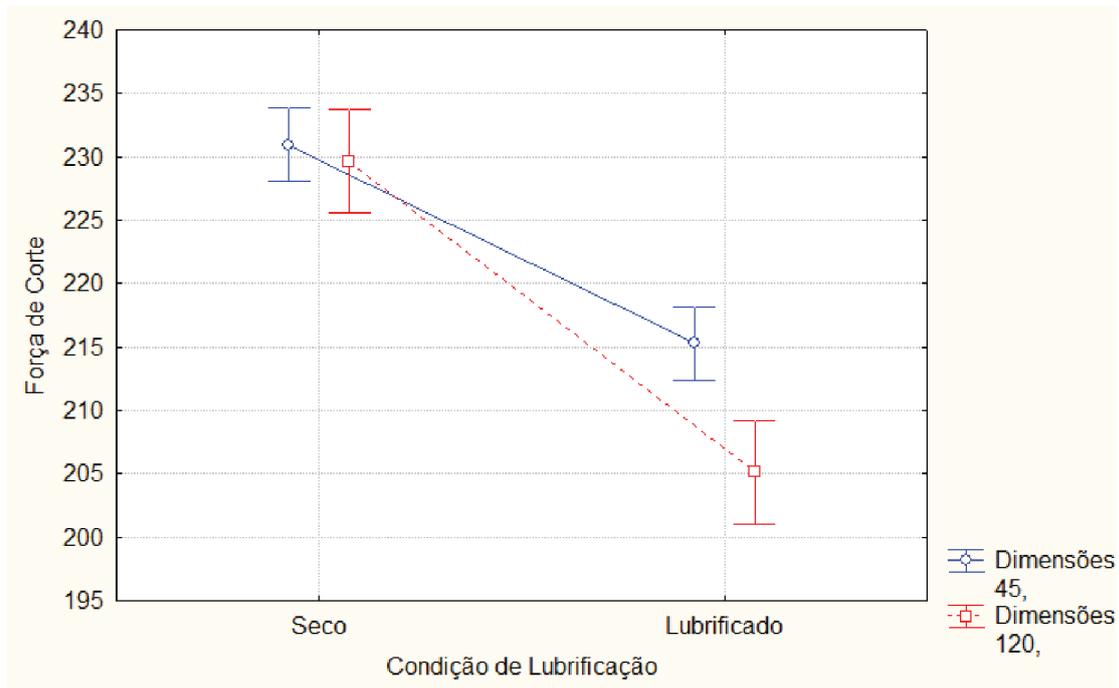


Figura 4.25 – Gráfico da margem dos meios e limites dos coeficientes, do preenchimento das texturas com  $\text{MoS}_2$  em duas condições de dimensões para análise da força de corte.

#### 4.5 Temperatura de Usinagem

Na Figura 4.26 tem-se a comparação entre um torneamento com textura tipo PE45 à esquerda e ferramenta lisa à direita, ambos para  $v_c = 400$  m/min. O cavaco helicoidal tubular permanece em contato por mais tempo com a interface do corte, transmitindo calor para a barra. Na ferramenta texturizada, os cavacos na forma de arcos-soltos ejetam-se com maior frequência da interface de corte, ajudando a dissipar o calor gerado. Observa-se maior intensidade do campo térmico na barra torneada com ferramentas sem textura.

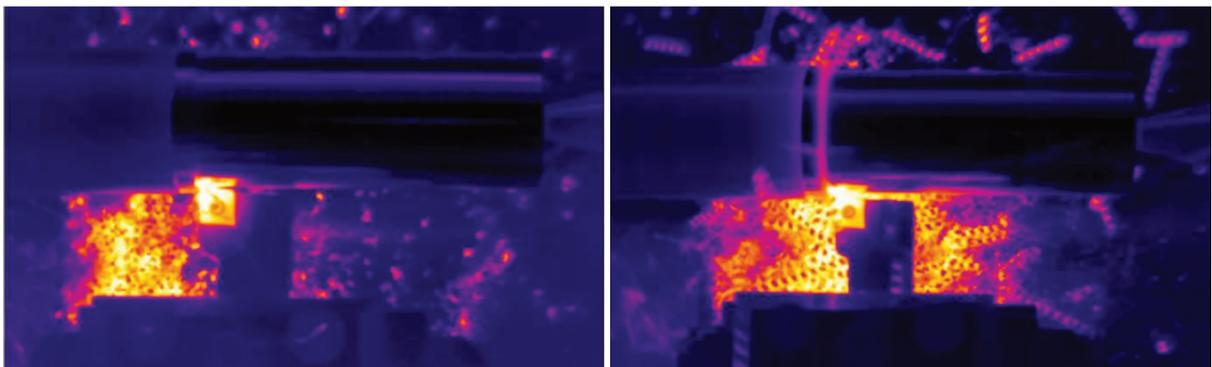


Figura 4.26 – Comparação térmica entre a presença (esquerda) e ausência (direita) de textura na ferramenta de corte durante o torneamento com  $v_c = 400$  m/min. A ferramenta sem textura

está 16 °C acima da texturizada, mas a maior diferença entre estes testes está no calor passado para a barra quando a ferramenta é sem textura. Tal efeito está relacionado ao maior tempo do cisalhamento do cavaco nesta condição.

É de amplo conhecimento na literatura especializada que, desprezando o desgaste da ferramenta, uma baixa temperatura de corte não favorece o processo, pois mantém o material com maior resistência mecânica e eleva as forças de usinagem, mas os resultados obtidos nos testes deste trabalho mostraram menores temperaturas, mas também menores forças para a menor velocidade de corte, portanto, contrariando a literatura. Aqui a redução acontece na faixa de temperatura ideal para o torneamento de alumínio: a propriedades mecânicas do alumínio 2011-T4 se mantém as usuais até 190°C (Aluminum Association et al., 2000). É importante lembrar que as temperaturas obtidas por termocâmara não correspondem exatamente com a temperatura da interface cavaco-ferramenta, mas sim a uma aproximação da superfície da ferramenta. Os resultados buscam estimar temperaturas para efeito de comparação entre as demais condições estudadas.

Os gráficos das Figuras 4.27 e 4.28 mostram a média das máximas temperaturas da superfície da ferramenta em cada frame obtido com a termocâmara durante a usinagem. A presença de texturas favoreceu a redução de temperatura em todos os casos que não houve quebra na aresta de corte (textura tipo PA120) em ambas as velocidades, e textura tipo PA45 para  $v_c = 400$  m/min). A maior redução foi para a textura tipo PE45 com lubrificante ( $v_c = 400$  m/min), que reduziu a temperatura em mais de 9% em comparação com a ferramenta sem textura. Tal valor corrobora com o trabalho de Sun et al. (2016), que também realizaram torneamento com ferramentas texturizadas preenchidas com MoS<sub>2</sub>, e encontraram valores de redução de temperatura numa faixa de 7 a 21%. Ainda há trabalhos como o de Jesudass e Kalaichelvan (2018) que tornearam alumínio e encontraram reduções de temperaturas de poucos mais de 3% para ferramentas texturizadas. Um valor menor, mas condizendo com o tipo de textura testada: *dimples* (neste tipo a redução de área de contato é menor do que em texturas *grooves*).

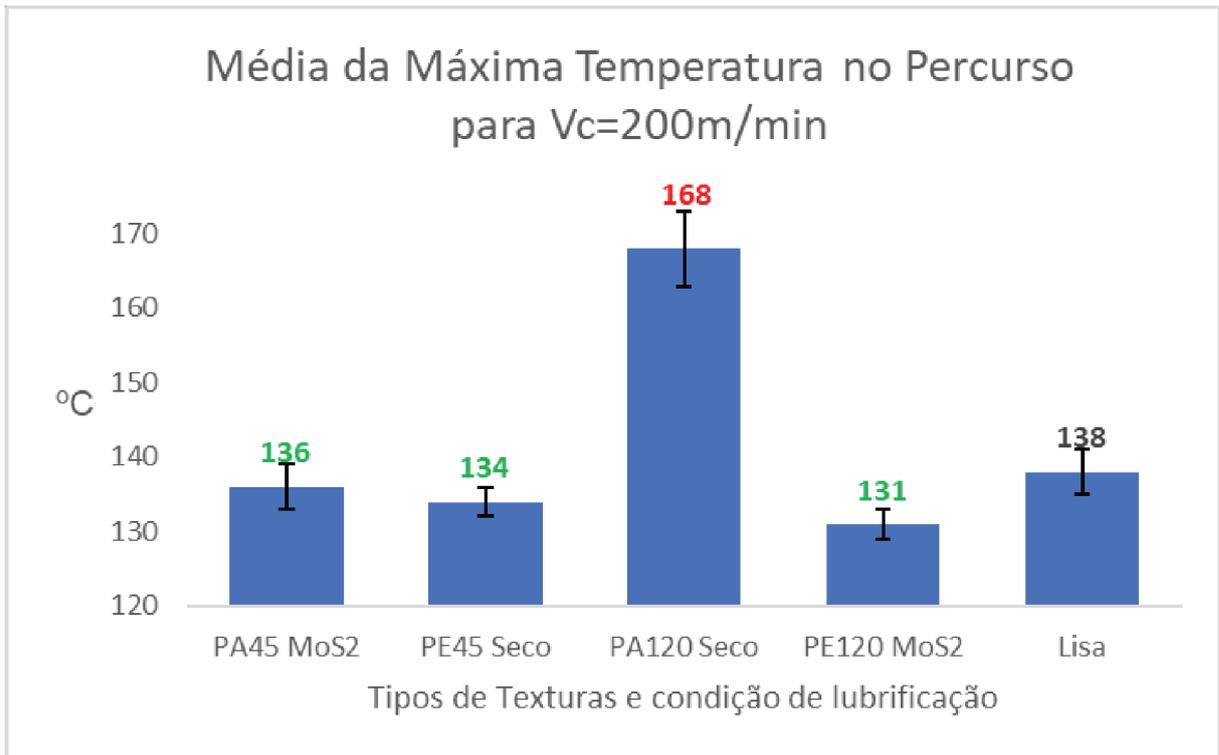


Figura 4.27 – Média das máximas temperaturas da superfície da ferramenta de corte para  $v_c = 200$  m/min.

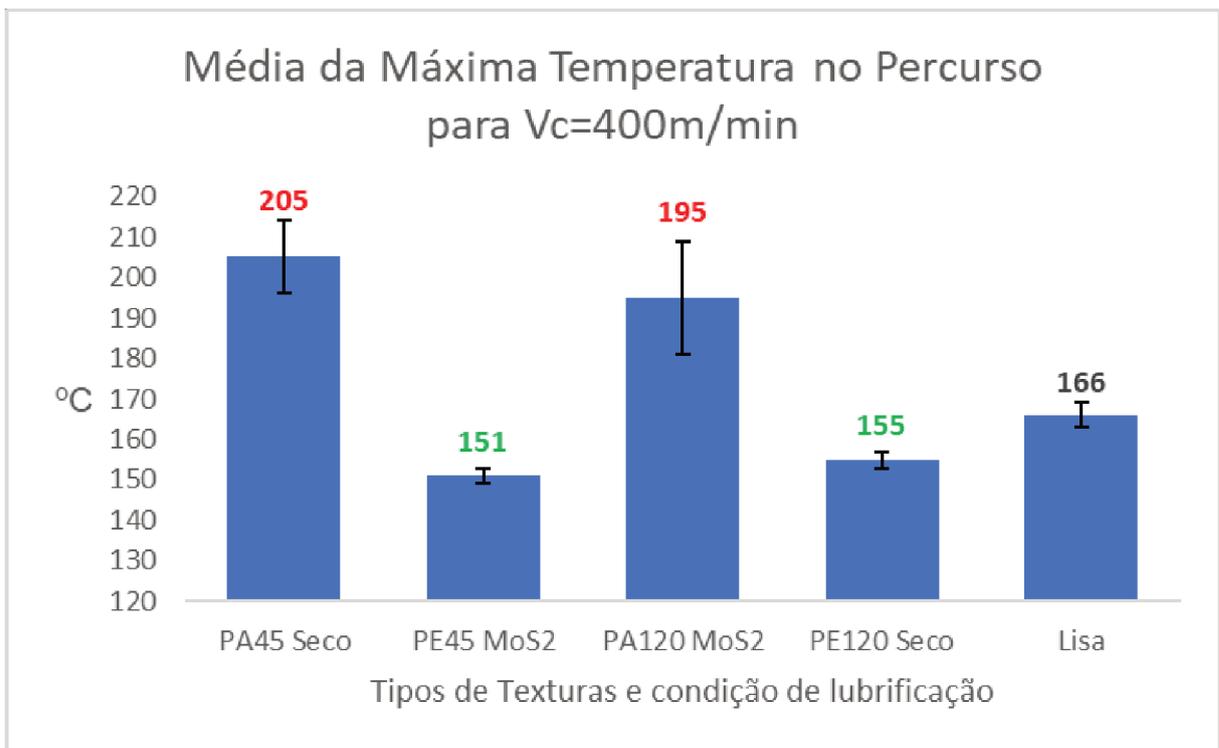


Figura 4.28 – Média das máximas temperaturas da superfície da ferramenta de corte para  $v_c = 400$  m/min.

A Tabela 4.2 mostra a análise da variância (Anova) da temperatura no torneamento, considerando todas as variáveis das condições dos ensaios. Nota-se que os parâmetros velocidade de corte, direção e condição de lubrificação das texturas são considerados significativos para a temperatura, com um índice de confiabilidade de 95%. Assim como na análise de forças, também foi realizada uma análise estatística excluindo a textura tipo PA120 (que quebrou em todas as condições em que foi testada), e ainda assim, os parâmetros encontrados como significantes foram os mesmos.

Tabela 4.2 – Análise da variância para a Temperatura de Usinagem

<b>Fator</b>	<b>S.Q</b>	<b>G.L</b>	<b>F</b>	<b>Valor-p</b>
Direção da Textura	6633,38	1	71,64592	-0,000000
Dimensões	198,37	1	2,14261	0,159606
Velocidade de Corte	7038,38	1	76,02025	-0,000000
Condição de Lubrificação	900,37	1	9,72479	-0,005657
Erro	1759,12	1		
Total S.Q.	16529,63	5		

Na Figura 4.29, tem-se o diagrama de Pareto das variáveis sobre a temperatura, que é similar ao gráfico do Pareto sobre Força (Figura 4.24). Como já esperado, a velocidade de corte é o maior responsável pela variação da temperatura. Os demais parâmetros influentes, direção da textura e lubrificação, seguem a mesma lógica vista para as forças de usinagem.

Sobre os parâmetros influentes, o gráfico da Figura 4.29 indica também, através dos sinais (positivos ou negativos), qual das duas opções em cada parâmetro ocorre o aprimoramento dos resultados de temperatura. Neste caso, temos que as menores temperaturas ocorrem para:

- a velocidade de corte: 200 m/min.
- a direção da textura: perpendicular à aresta de corte;
- a condição de lubrificação: com MoS<sub>2</sub>;

Ao contrário do trabalho de Patel et al. (2020), as dimensões de texturas *grooves* lineares não apresentaram influência significativa na temperatura no torneamento. Isso ocorre porque Patel et al. (2020) variaram muito mais parâmetros de dimensões de texturas em várias combinações: espaçamento, distância da aresta de corte, profundidade e largura. Outra

diferença foi o material estudado, o Ti6Al4V, o qual tem propriedades muito diferentes do alumínio.

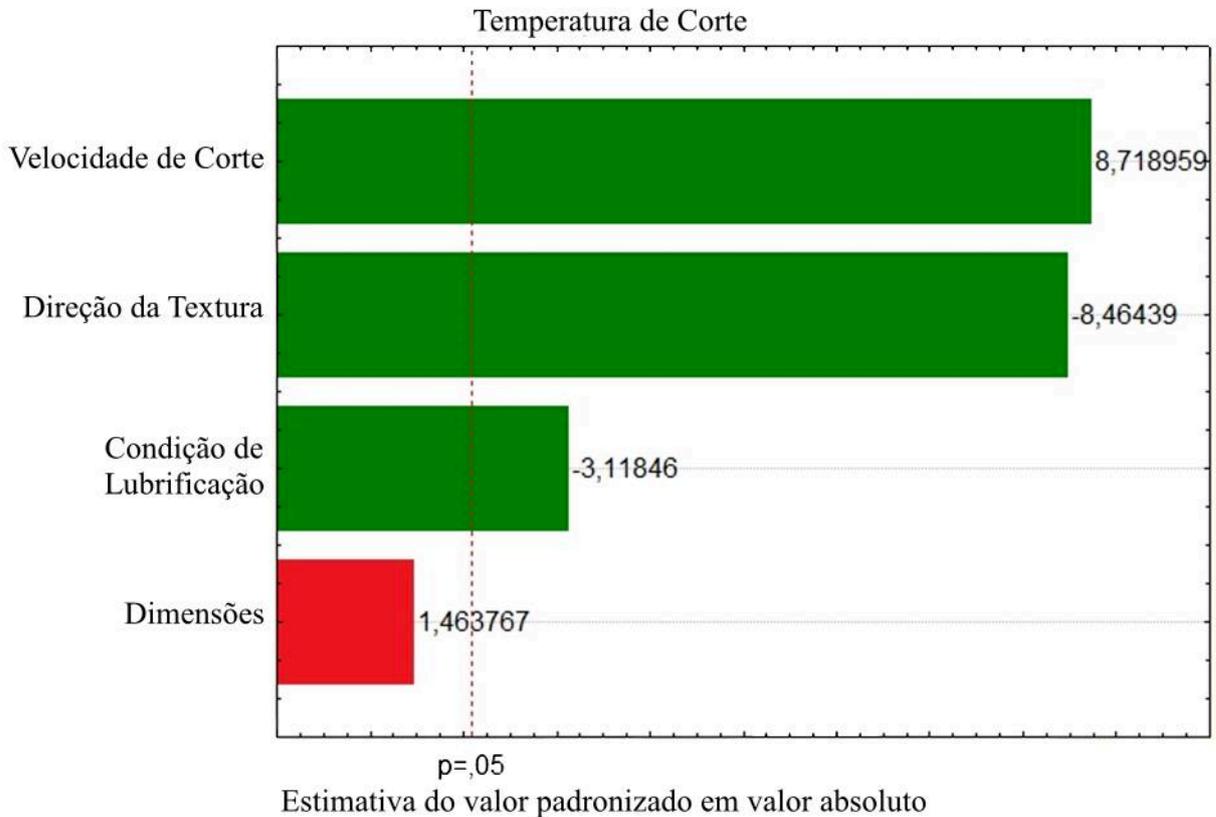


Figura 4.29 – Diagrama de Pareto mostrando a influência das variáveis estudadas sobre a temperatura em todas as condições de ensaios.

Apesar das dimensões das texturas não serem um parâmetro com significância identificada pela Anova, os resultados indicam uma possível tendência de correlação das dimensões com as temperaturas (que poderia ser futuramente avaliada num planejamento fatorial completo), sendo que maiores dimensões correspondem em reduções de temperatura, principalmente na maior velocidade de corte de 400 m/min (Figura 4.30). Uma hipótese para tal efeito é a maior redução na área de contato para maiores dimensões de texturas. Ainda há a questão da maior deformação do cavaco, que favorece a geração de cavacos na forma de arcos ainda mais soltos em relação aos cavacos oriundos das texturas de menores dimensões. Dessa maneira, a dissipação do calor pelos cavacos é maior nas texturas de maiores dimensões.

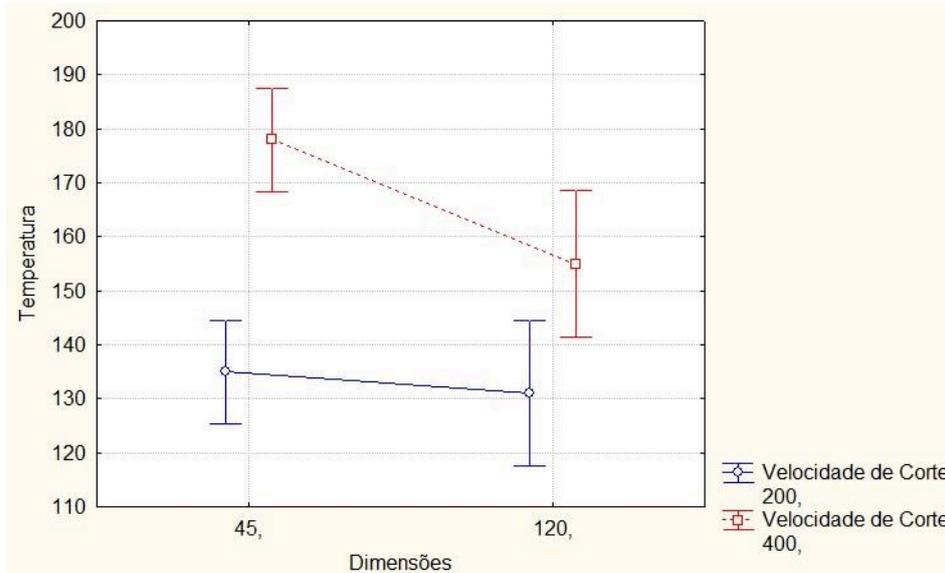


Figura 4.30 – Gráfico de influência das dimensões da textura na Temperatura para as duas condições de velocidade de corte ensaiadas.

#### 4.6 Rugosidade da Peça Usinada

Para avaliar a rugosidade da superfície das barras de alumínio, considerou-se os parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_q$ , e  $R_z$ , como justificado no tópico 3.6.4. Na Figura 4.31, encontram-se as barras torneadas, da esquerda para a direita, por ferramentas lisas, texturas tipos PA45, PE45, PA120 e PE120. Há uma nítida marca em um determinado comprimento da superfície usinada, cuja parte superior corresponde ao torneamento com  $v_c = 200$  m/min e a inferior com  $v_c = 400$  m/min. Nota-se a grande quantidade de rebarbas geradas na barra usinada com a ferramenta com textura tipo PA120, que teve suas arestas quebradas em todas as condições avaliadas.

Novamente é interessante ressaltar que a Figura 4.22 (vista no tópico 4.4 Forças de usinagem), também é importante para as análises de rugosidade, pois a variação/oscilação da força no decorrer da aquisição evidencia a vibração ocorrida no corte, fenômeno o qual é um forte influenciador nos resultados de rugosidade da peça torneada. Logo é possível ver analogamente como os testes com maiores oscilações (que correspondem à vibração) estão associados aos resultados de rugosidade discutidos neste tópico.



Figura 4.31 – Barras torneadas. A parte superior corresponde à  $v_c = 200$  m/min e a inferior à  $v_c = 400$  m/min.

Diferente dos resultados obtidos nas análises de forças e temperaturas, na análise de rugosidade das peças, apenas as texturas tipo PE45 para  $v_c = 200$  m/min e as texturas tipo PE120 para ambas as velocidades de corte estudadas reduziram a rugosidade em relação às ferramentas sem texturas. Os gráficos das Figuras 4.32 e 4.33 exibem tais resultados.

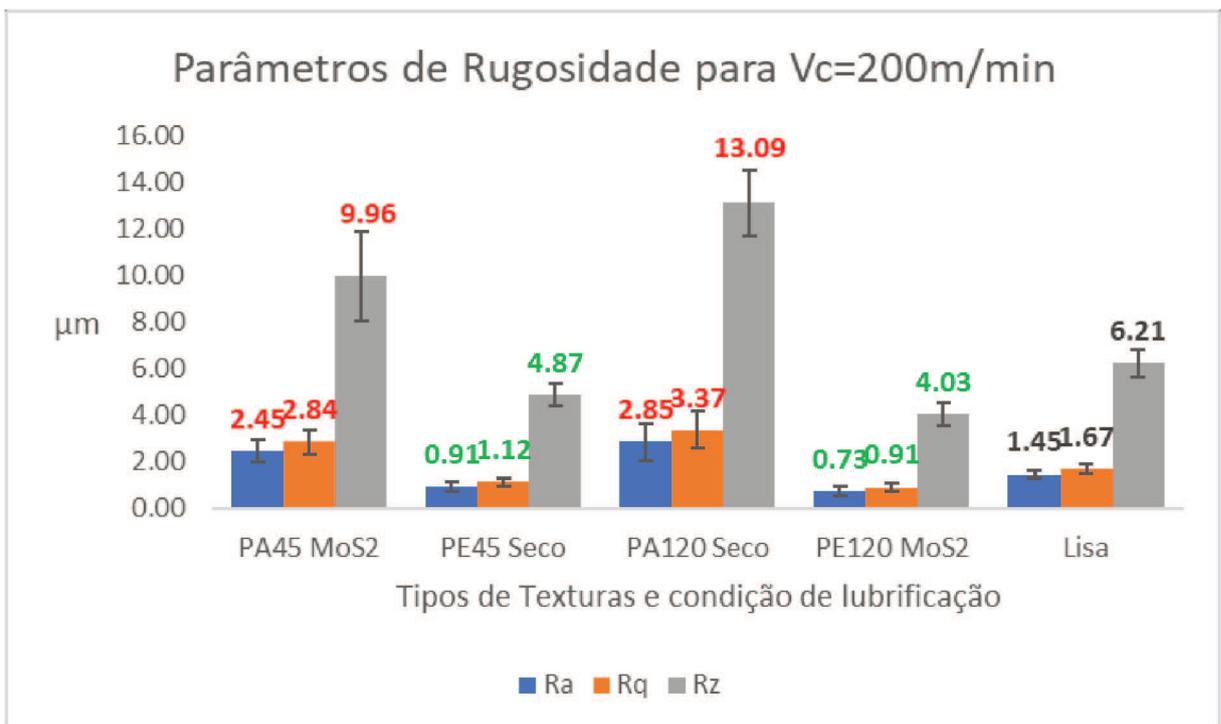


Figura 4.32 – Média dos parâmetros de rugosidade nas barras usinadas com cada tipo de ferramenta de corte ensaiada, com  $v_c = 200$  m/min.

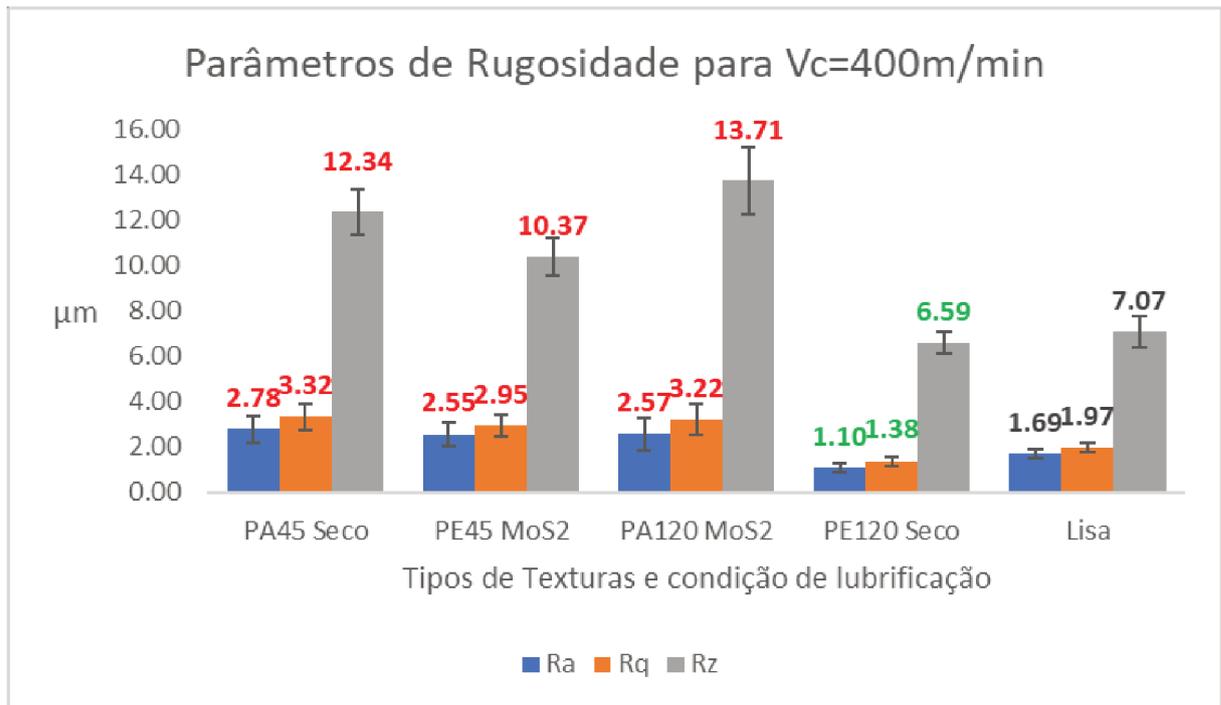


Figura 4.33 – Média dos parâmetros de rugosidade nas barras usinadas com cada tipo de ferramenta de corte ensaiada, com  $v_c = 400$  m/min.

A maior melhora na rugosidade (Ra) foi no caso da textura tipo PE120 com preenchimento de MoS<sub>2</sub> ( $v_c = 200$  m/min), com uma redução de 49,65% em relação à uma ferramenta sem textura. Tal aprimoramento é mais que o dobro encontrado nos estudos de Jesudass e Kalaichelvan (2018), que encontraram uma redução de 23,21% na rugosidade ao tornear também alumínio, mas, com texturas do tipo *dimple*. No artigo de Sun et al. (2016), que também tornearam alumínio com texturas *grooves*, o resultado encontrado por eles foi de uma redução no Ra de 43-69 %, faixa a qual engloba os resultados obtidos no presente trabalho.

A Tabela 4.3 mostra a análise da variância (Anova) da rugosidade considerando todas as variáveis dos ensaios. Como os 3 parâmetros de rugosidade analisados seguiram uma mesma tendência, apenas o parâmetro Ra será utilizado como referência. Nota-se que os parâmetros de direção das texturas e velocidade de corte são considerados significativos para a rugosidade da superfície usinada (valor-p < 0,05), com um índice de confiabilidade de 95%.

Tabela 4.3 – Análise da variância para a Rugosidade (Ra) da peça usinada

<b>Fator</b>	<b>S.Q</b>	<b>G.L</b>	<b>F</b>	<b>Valor-p</b>
Direção da Textura	10,77360	1	51,07054	-0,000001
Dimensões	0,77760	1	3,68609	0,070010
Velocidade de Corte	1,59135	1	7,54354	-0,012831
Condição de Lubrificação	0,16335	1	0,77433	0,389874
Erro	4,00815	1		
Total S.Q.	17,31405	5		

Na Figura 4.34, tem-se o diagrama de Pareto das variáveis sobre a rugosidade. Por ele conclui-se que a direção da textura, seguida pela velocidade de corte, são as maiores responsáveis pela variação da rugosidade da peça torneada. As dimensões da textura e a condição lubrificante não se apresentaram com influência significativa. Porém, como já observado na análise de força, a textura tipo PA120, com seus resultados excessivamente discrepantes, acabam por mascarar os efeitos dos outros parâmetros. A grande quantidade de rebarbas encontradas unicamente na barra que torneou a textura tipo PA120 reforçam tal ideia (rever Figura 4.31).

Assim, novamente optou-se por realizar um novo gráfico de Pareto, descartando a textura tipo PA120. Assim como na análise de força (e ao contrário da análise de temperatura), para a rugosidade o novo gráfico gerado mostrou um resultado diferente para a significância das variáveis (Figura 4.35).

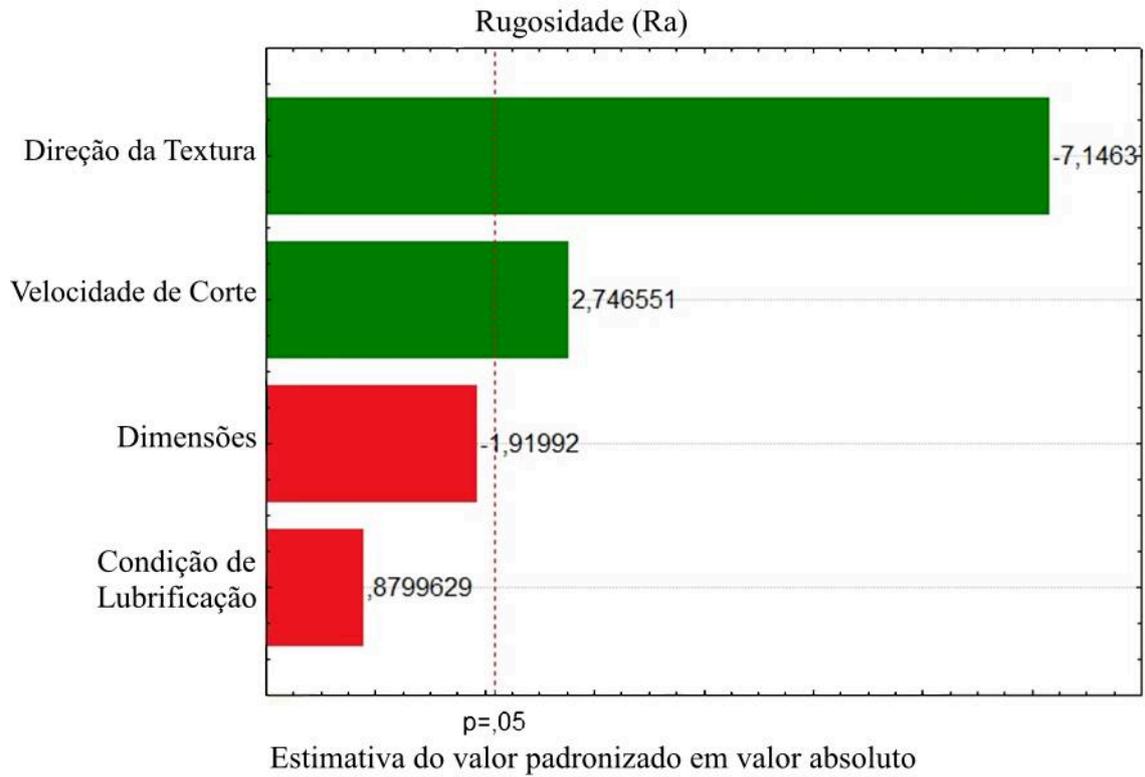


Figura 4.34 – Diagrama de Pareto sobre a rugosidade Ra para as variáveis em todas as condições de ensaios.

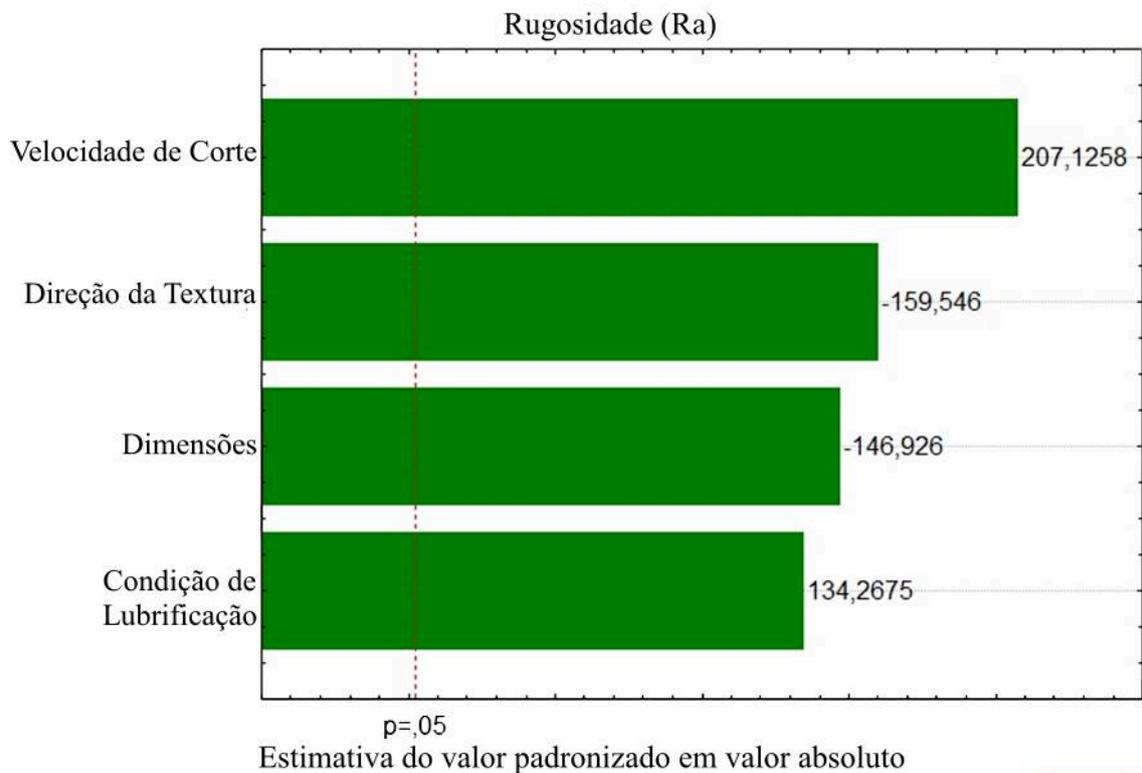


Figura 4.35 – diagrama de Pareto sobre a rugosidade Ra para as variáveis excluindo os ensaios de texturas do tipo PA120.

Com o novo diagrama de Pareto observa-se que todas as variáveis têm influência significativa na rugosidade final da peça torneada. O parâmetro de direção das texturas segue a mesma linha das outras análises, sendo a direção perpendicular à aresta de corte a mais favorável. Sobre os parâmetros influentes, o gráfico da Figura 4.29 indica também, através dos sinais (positivos ou negativos), qual das duas opções em cada parâmetro ocorre o aprimoramento dos resultados de rugosidade. Neste caso, temos que as menores rugosidades correm para:

- a velocidade de corte: 200 m/min.
- a direção da textura: perpendicular à aresta de corte;
- as dimensões da textura: maiores (120  $\mu\text{m}$ );
- a condição de lubrificação: sem  $\text{MoS}_2$ ;

Para a análise da influência dos outros parâmetros de texturas, não há muitas referências sobre o efeito de cada um sobre a rugosidade, quando se trata de texturas *grooves*. Geralmente, encontram-se mais referências para texturas do tipo *dimple* para a análise na rugosidade em peças de alumínio. Logo, para avaliar o efeito de cada parâmetro foram feitos gráficos de influências apresentados nas Figuras 4.36 e 4.37.

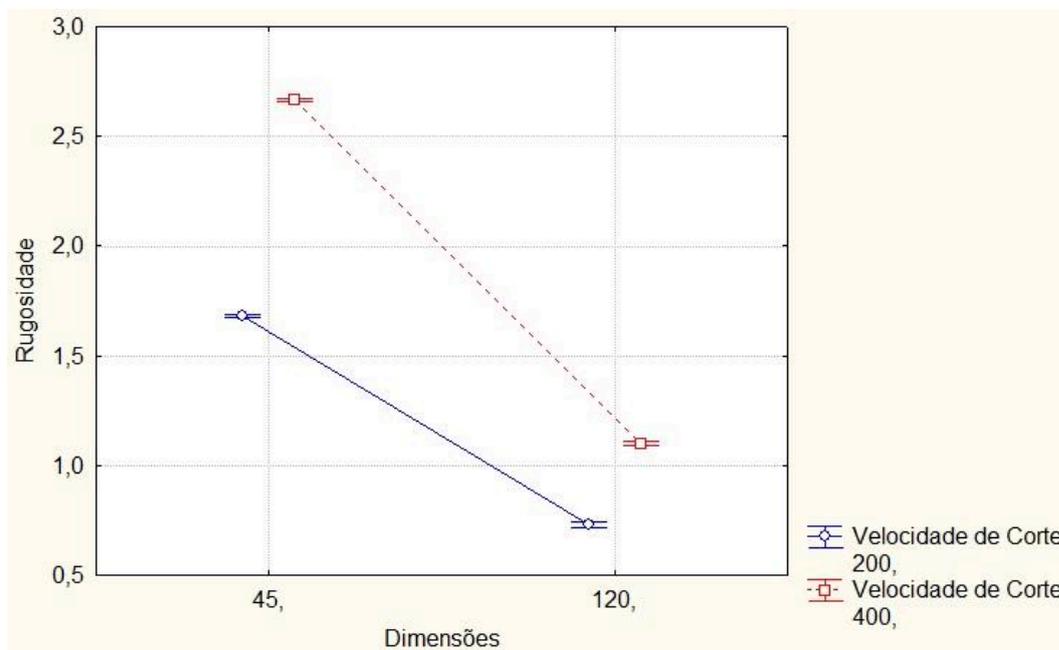


Figura 4.36 – Gráfico mostrando a influência das variáveis dimensões das texturas para as duas condições de velocidade de corte utilizadas sobre a rugosidade Ra.

A Figura 4.36 mostra uma clara tendência da redução da rugosidade para o aumento das dimensões da textura em ambas as velocidades de cortes trabalhadas, sendo que nas velocidades mais baixas, a rugosidade é menor ainda. Uma possível explicação para tal fenômeno seria que as texturas de maiores dimensões favorecem a frequência e segmentação dos cavacos (como já explicado anteriormente no tópico 4.3), o que favorece inclusive a dissipação do calor, evitando aquecimento da peça (rever Figura 4.26). A textura também dá ao cavaco condições para se deformar gradativamente de acordo com a sua geometria, onde o corte da peça torna-se mais suave, melhorando a integridade superficial da peça final.

No gráfico de tendência da Figura 4.37 é mostrado que a presença do lubrificante sólido, ao contrário do esperado, aumenta da rugosidade Ra nas peças. Essa tendência mostra-se inconsistente, pois o melhor resultado de rugosidade consistiu num teste lubrificado. Ainda há outros indicativos, como na Figura 4.22, em que é possível associar a oscilação das forças durante o curso de usinagem como um efeito de vibração. Nessa Figura 4.22 nota-se que os testes com maiores vibrações coincidem com testes lubrificados em apenas 2 dentre os 4 tipos de texturas. Indo além, estes 2 casos lubrificados e com maior vibração, são testes com ensaios em maiores velocidades ( $v_c = 400$  m/min). Analisando então a diferença de velocidades de corte entre os gráficos de cada tipo de textura, fica evidente que essa é a variável mais correlacionada com a vibração, e conseqüentemente com a rugosidade (conforme visto no diagrama de Pareto da Figura 4.35). Logo o lubrificante, de maneira geral, pode não influenciar tanto o resultado, quanto à resposta de rugosidade, indicando que os efeitos estão nas outras variáveis de entrada.

Portanto, essa tendência apresentada na Figura 4.37 pode ser um indicativo da necessidade de se realizar um experimento em fatorial completo, pois os tipos de texturas são diferentes entre cada ponto do gráfico, o que pode mascarar o resultado, uma vez que os valores de rugosidade são mais próximos entre si, e o fator p de significância para a condição de lubrificação é o menor na análise estatística.

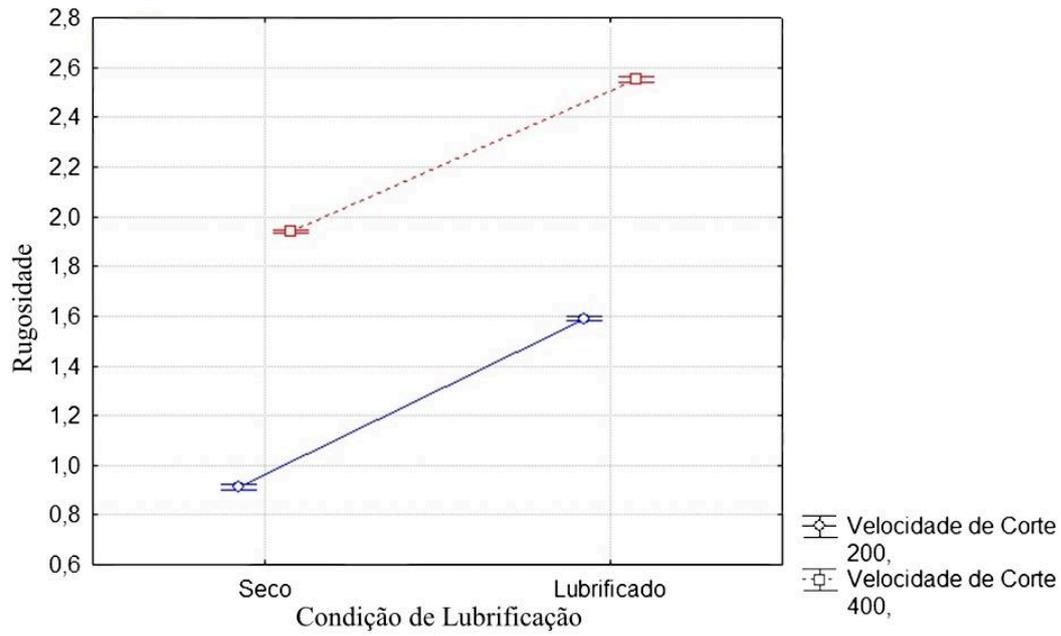


Figura 4.37 – Gráfico mostrando a influência do preenchimento das texturas com  $\text{MoS}_2$  em duas condições de velocidade de corte sobre a rugosidade Ra.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados encontrados e analisados permitem tirar as seguintes conclusões:

- A produção de texturas *grooves* em PCD por usinagem a laser femtossegundos gera poucos detritos, e sua limpeza é fácil, não requerendo jatos abrasivos ou ação de químicos específicos como no caso da texturização de alguns outros materiais. Cerdas de dimensões compatíveis com pasta de diamante são suficientes para a remoção dos detritos;
- Ainda sobre a produção de texturas em PCD por usinagem com laser femtossegundos, foi constatado que para dimensões abaixo de 50  $\mu\text{m}$ , apesar de ser possível produzir as duas dimensões, a razão entre a largura e a profundidade não se mantém estável. Ao longo da profundidade, a largura tende a reduzir. Isso não ocorre para dimensões maiores, como nos casos acima de 115  $\mu\text{m}$ . Sobre a profundidade também é fato que para quaisquer dimensões, ela aumenta ao final do passe do laser na trajetória do sulco (último 0,5 mm), região com velocidade de passe em desaceleração. Para texturas de profundidade de 45  $\mu\text{m}$  esse aumento foi de 11% e para 120  $\mu\text{m}$  foi de 25%;
- O efeito das texturas tem uma forte correlação com o tipo de material usinado, em que ao se trabalhar com materiais dúcteis ou duros/frágeis a influência de alguns parâmetros podem até ser opostas. No caso de materiais mais duros, a textura atua principalmente como uma redução da área de contato, como verificado na literatura, enquanto que em materiais dúcteis, há uma grande deformação dos cavacos, como constatado neste trabalho;
- Na usinagem de materiais dúcteis como o alumínio, as texturas paralelas à aresta de corte (perpendiculares ao fluxo de cavacos) pioram os resultados, pois, o ancoramento do material é muito forte e pode até causar trincas em texturas maiores. A direção das texturas ideal para este tipo de material é sem dúvida perpendicular à aresta de corte (paralela ao fluxo de cavacos);

- Os cavacos gerados na usinagem do alumínio se deformam excessivamente na presença de texturas na ferramenta de corte, causando um endurecimento e conseqüentemente uma fragilização desse cavaco. Quanto maiores as texturas, maior o endurecimento. Os cavacos que com ferramentas sem texturas apresentaram a forma helicoidal tubular curto, ao utilizar ferramentas texturizadas passaram ser da forma de arcos soltos;
- A presença de lubrificante sólido foi capaz de reduzir o material retido dentro das texturas, favorecendo o fluxo de cavacos, e reduzindo forças e temperatura no corte;
- No torneamento do Alumínio 2011-T4, velocidade de corte entre 200 e 400 m/min e com ferramenta com ângulo de posição de 95° e raio 0,4 mm, não há força passiva significativa no corte. Nessa operação, enquanto a aresta de corte permanecer íntegra (sem lascamento), a força predominante é a força de corte;
- As texturas possuem grande influência na força de avanço, porém estas são muito pequenas em relação à força de corte. Logo, a influência das texturas na força de corte, apesar de menor, é o que rege o efeito na força de usinagem;
- Para os parâmetros de saída de força e temperatura, os parâmetros da textura mais influentes (com índice de confiança de 95%) são direção e condição de lubrificação. A direção que favorece a usinagem é com texturas perpendiculares à aresta de corte (paralelas ao fluxo de cavacos), principalmente com a deposição de lubrificante MoS<sub>2</sub>. As dimensões não apresentaram influência significativa para o planejamento fatorial estudado, porém há uma leve tendência nos resultados que indicam que maiores dimensões favorecem a redução da temperatura. No caso da temperatura, entretanto, a velocidade de corte se mostrou o parâmetro mais influente entre os estudados;
- As maiores reduções de força de usinagem e de temperatura foi para a textura tipo PE45 com lubrificante MoS<sub>2</sub>, sendo mais de 7 % de redução para a força e 9 % para a temperatura;

- Para a rugosidade, todos os parâmetros apresentaram uma influência significativa nos resultados, especialmente direção e dimensões das texturas. A direção que favorece a redução no parâmetro Ra da rugosidade da peça é perpendicular à aresta de corte (paralela ao fluxo de cavacos), e quanto às dimensões, as maiores são as que favorecem a redução do Ra;

- A maior redução na rugosidade da peça usinada foi para a textura tipo PE120 com lubrificante MoS<sub>2</sub>, em 49% para o Ra.

### **5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

- A respeito da aplicação do lubrificante sólido, é possível a sua automatização, viabilizando seu emprego em aplicações industriais. Logo, seria interessante estudar alguns métodos para isso, de forma que não seja necessária uma parada das máquinas. Sendo viável e de suma importância o estudo de um método capaz de expelir uma mistura, em quantidade mínima, de lubrificante, saindo pelas próprias texturas;

- A quebra de arestas de cortes comprometeu uma pequena parte do estudo. Portanto, realizar simulações para diferentes geometrias é uma ótima maneira de se evitar tal transtorno. Logo, ao contrário das simulações envolvendo texturas encontradas na literatura, os quais buscam analisar seus efeitos na usinagem, seria importante estudar a resistência mecânica da ferramenta de corte texturizada. As texturas atuam como acumuladores de tensão e há casos em que podem comprometer a estrutura texturizada. É preciso estudos que envolvam os esforços e geometrias de texturas atuantes num determinado tipo de material de ferramenta de corte. Dessa maneira, ficariam mais evidentes os limites dos parâmetros geométricos para realizar texturas: distância das texturas até a aresta de corte, largura, profundidade e espaçamento entre as texturas;

- A quantidade de trabalhos com referências em análises de temperatura para usinagem em alumínio com ferramentas texturizadas é pequena. E, no que se diz respeito à rugosidade, é menor ainda. Sendo assim, infere-se que há uma lacuna de estudos a ser preenchida nessa área envolvendo tais variáveis de saída.

## 6 REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR ISO 209 - **Alumínio e suas ligas** - Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:

<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/29879/abnt-nbriso209-aluminio-e-suas-ligas-composicao-quimica> Acesso em 08/02/2022.

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>

ALCAN, **Manual da Soldagem, Alcan Alumínio do Brasil S/A**, 1<sup>o</sup> edição.1993.

ALI, Bakhtiar; LITVINYUK, Igor V.; RYBACHUK, Maksym. Femtosecond laser micromachining of diamond: current research status, applications and challenges. **Carbon**, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.04.025>

ALUMINUM ASSOCIATION et al. Aluminum standard and data, **Aluminum Association**, 2000. Disponível em:

<https://www.aluminum.org/aluminum-standards-and-data> Acesso em 08/02/2022.

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>

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/TiB<sub>2</sub> composite. **Measurement**, v. 137, p. 636-646, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.013>

ARUMUGAPRABU, Veerasimman et al. Performance of surface-textured end-mill insert on AISI 1045 steel. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 34, n. 1, p. 18-29, 2019

<https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1512119>

BATZER, S.A. , HAAN, D.M., RAO, P.D., Olson, W.W., Sutherland, J.W, **Chip morphology and hole surface texture in the drilling of cast Aluminum alloys**, Journal of Materials Processing Technology 79, 72–78 pags, 1988.

[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00324-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00324-5)

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>

CALLISTER, William D. The Introductory Materials Science and Engineering Course. **MRS Online Proceedings Library (OPL)**, v. 760, 2002.

<https://doi.org/10.1557/PROC-760-JJ6.1>

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>

CLARK, L E.; SEM, P. K. Advances in the development of ultrahard cutting tool material. **Industrial Diamond Review**, n. 2, p. 40-44, 1998.

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>

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.ijmactools.2004.03.001>

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

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>

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>

DURAIRAJ, Shanmugasundaram et al. An experimental study into the effect of micro-textures 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, Shiqi; KLEIN, Sven. Surface structuring of polycrystalline diamond (PCD) using ultrashort pulse laser and the study of force conditions. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 84, p. 105036, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105036>

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 self-lubricating ceramic cutting tools by in-situ forming of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-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 self-lubricating ceramic cutting tools with different morphology parameters formed via in situ forming of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-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>

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-target-emissivity/> Acesso em 08/02/2022.

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>

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 MoS<sub>2</sub>-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 MoS<sub>2</sub> coated mechanical micro-textured 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>

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>

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>

HATCH, J. E. Aluminum Its Properties and Physical Metallurgy. **American Society for Metals, Metals Park, Ohio**, 1984.

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 08/02/2022.

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, S.; KALAICHELVAN, K. 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>

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>

KELLY, J. F.; COTTERELL, M. G. Minimal lubrication machining of aluminium alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 120, n. 1-3, p. 327-334, 2002.

[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01126-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01126-8)

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>

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. p. 436-447.

<https://doi.org/10.1117/12.206276>

KUMAR, Ch Sateesh; PATEL, Saroj Kumar. Effect of WEDM surface texturing on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/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>

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>

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, Zeng Qiang; WU, Qi; WANG, Jun. Ultrashort pulsed laser micromachining of polycrystalline diamond. In: **Advanced materials research**. Trans Tech Publications Ltd, 2012. p. 220-224.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.497.220>

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>

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, 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>

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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics. **Ceramics International**, v. 44, n. 11, p. 13205-13217, 2018-B.

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.146>

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>

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>

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

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](https://mapal.com/medias/sys_master/root/hd1/h2f/8837573312542/190226-Drehen-PT/190226-Drehen-PT.pdf). Acesso em: 01/12/2021.

MCCULLOCH, Q.; GIGAX, J. G.; HOSEMANN, 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, 2018-A.

<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>

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>

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>

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

OGAWA, Yoshinori et al. A study on machining of binder-less polycrystalline diamond by femtosecond pulsed laser for fabrication of micro milling tools. **CIRP Annals**, v. 65, n. 1, p. 245-248, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.081>

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>

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>

POLINI, R.; CASADEIB, F.; D'ANTONIO, P., TRAVERSA, E., Dry turning of alumina / aluminum composites with CVD diamond coated Co-cemented tungsten carbide tools, **Surface & coatings technology**, v.166, n. 2-3, p.127-143, mar. 2003.

[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00775-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00775-2)

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>

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>

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.protecy.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>

SCHUITEK, Aloisio Jose et al. **Usinabilidade de ligas de alumínio tratáveis termicamente**. Orientador: Walter Lindolfo Weingaertner. 1997. 165 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/77163/143984.pdf?sequence=1>.

Acesso em 08/02/2022.

SHARMA, Varun; PANDEY, Pulak 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, Varun; PANDEY, Pulak 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>

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>

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>

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 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>

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>

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-A.

<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-B.

<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. 1821-1827, 2004.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.169>

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>

TOROPOV, A.; KO, S.; KIM, B. **Experimental study of burrs formed in feed direction when turning aluminum alloy Al6061-T6**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. v. 45, n. 9, p. 1015–1022, jul. 2005.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.031>

TRENT, Edward M.; WRIGHT, Paul K. **Metal cutting**. Butterworth-Heinemann, 2000.

<https://doi.org/10.1016/B978-075067069-2/50007-3>

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 MoS<sub>2</sub> 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>

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas**: tornear, fresar, furar e serra. 2. ed. São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 79p, 1991.

WHITE, Yelena V. et al. Femtosecond micro-and nano-machining of materials for microfluidic applications. In: **Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices V**. International Society for Optics and Photonics, 2008. p. 70390J.

<https://doi.org/10.1117/12.799855>

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. p. V001T02A034.

<https://doi.org/10.1115/MSEC2017-2932>

XING, Youqiang et al. Analysis of tool-chip interface characteristics of self-lubricating tools with nanotextures and WS<sub>2</sub>/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. 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. 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, Shucai 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>

YANG, Shucaï; 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>

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. 13122-13135, 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-6Al-4V. **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 WS<sub>2</sub> soft-coatings. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 30, p. 492-501, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.018>

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, 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>

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>

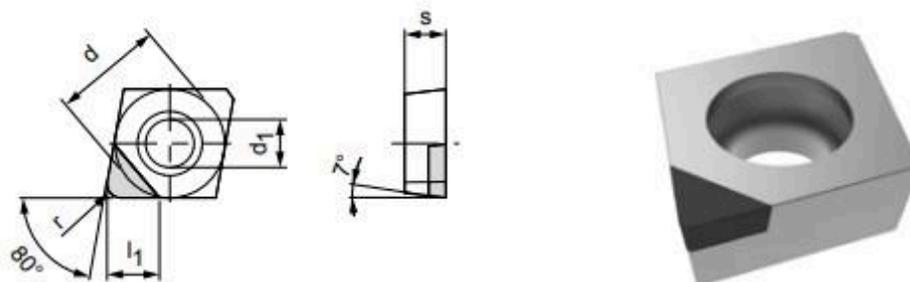
ZHU, Wu-Le et al. Ultrasonic elliptical vibration texturing of the rake face of carbide cutting tools for adhesion reduction. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 85, n. 9, p. 2669-2679, 2016.

<https://doi.org/10.1007/s00170-015-8084-0>



## CCGW

Inserto de corte PKD, ângulo de corte 0°



Especificação	Dimensões construtivas					PU620
	d	s	r	d <sub>1</sub>	l <sub>1</sub>	F01
CCGW 060204 F01N-0AA	6,35	2,38	0,4	2,8	3,1	30011027
CCGW 060208 F01N-0AA	6,35	2,38	0,8	2,8	3,0	30011028
CCGW 09T304 F01N-0AA	9,52	3,97	0,4	4,4	3,5	30011031
CCGW 09T308 F01N-0AA	9,52	3,97	0,8	4,4	3,4	30011032
<b>CCGW 120404 F01N-0AA</b>	<b>12,7</b>	<b>4,76</b>	<b>0,4</b>	<b>5,5</b>	<b>4,7</b>	<b>30011033</b>
CCGW 120408 F01N-0AA	12,7	4,76	0,8	5,5	4,6	30011034

Dimensões em mm.

Anexo 2 – Especificações e dimensões da ferramenta de corte de PCD utilizadas no presente estudo. Fonte: Mapal (2021).

