

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**EDUARDO SIGLER JUNIOR**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE FERRAMENTA DE CORTE  
CERÂMICA TEXTURIZADA A LASER NO TORNEAMENTO DO  
FERRO FUNDIDO FC250 E DO AÇO INOXIDÁVEL VSM13**

VITÓRIA

2023

EDUARDO SIGLER JUNIOR

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE FERRAMENTA DE CORTE  
CERÂMICA TEXTURIZADA A LASER NO TORNEAMENTO DO  
FERRO FUNDIDO FC250 E DO AÇO INOXIDÁVEL VSM13**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bertolete  
Carneiro

Coorientadora: Profa. Dra. Patrícia Alves  
Barbosa

VITÓRIA

2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

S574a Sigler Junior, Eduardo, 1991-  
Análise do desempenho de ferramenta de corte cerâmica texturizada a laser no torneamento do ferro fundido FC250 e do aço inoxidável VSM13 / Eduardo Sigler Junior. - 2023.  
126 f. : il.

Orientador: Marcelo Bertolete Carneiro.  
Coorientadora: Patricia Alves Barbosa.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Usinagem. 2. Óxido de alumínio. 3. Laser. 4. Ferro fundido.  
5. Aço inoxidável. 6. Tribologia. I. Carneiro, Marcelo Bertolete.  
II. Barbosa, Patricia Alves. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621

---



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

# ANÁLISE DO DESEMPENHO DE FERRAMENTA DE CORTE CERÂMICA TEXTURIZADA A LASER NO TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO FC250 E DO AÇO INOXIDÁVEL VSM13

**EDUARDO SIGLER JUNIOR**

## COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Marcelo Bertoletto Carneiro  
(Orientador PPGEM/UFES)

---

Profª. Drª. Patrícia Alves Barbosa  
(Coorientadora – PPGEM/UFES)

---

Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo  
(Examinador Interno – PPGEM/UFES)

---

Prof. Dr. Álisson Rocha Machado  
(Examinador Externo – PPGEM/PUCPR)

## **AGRADECIMENTOS**

A concretização desse mestrado é muito significativa em minha vida e para tanto agradeço imensamente a Deus por sempre me guiar pelo caminho certo.

Sou grato, ao orientador desta dissertação o Prof. Dr. Professor Marcelo Bertolete Carneiro, pela confiança, ensinamentos e disponibilidade depositada para a realização deste projeto. Sou grato também a minha coorientadora a profa. Dra. Professora Patrícia Alves Barbosa pelo apoio, pela troca de impressões e sua ajuda preciosa dada ao desenvolvimento do meu trabalho laboratorial. Ambos, apesar da intensa rotina de suas vidas, me mantiveram motivados durante todo o processo.

Meus sinceros agradecimentos ao pesquisador Dr. Wagner de Rossi do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), à Gerente de produtos da Mahr, Tatiana Dias Santana. Agradeço ao Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT) e ao Laboratório de Tecnologia Mecânica (LabTecMec) pelo apoio e infraestrutura para a execução deste trabalho. Também agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM/UFES), a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e aos seus docentes pela infraestrutura, pelo apoio técnico-científico que contribuíram para o desenvolvimento do trabalho e para o meu desenvolvimento intelectual.

Um obrigado especial a minha mãe Maria Helena e a meu pai Eduardo Sigler, pelo apoio incondicional e incentivos, mesmo nos momentos difíceis e em todas as áreas da minha vida. Esta dissertação é a prova de que os esforços deles pela minha educação não foram em vão e valeram a pena.

Agradeço a minha namorada Thayanne Shaiene Souza Costa pela preocupação e pelo permanente incentivo para a conclusão deste trabalho. Agradeço ainda a paciência que teve, nos meus momentos de ausência. Agradeço aos meus colegas de pós-graduação Davi de Carli e Luma Gonçalves Fraga.

A todos que me auxiliaram direta ou indiretamente, o meu profundo e sincero obrigado.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de ferramentas de corte de cerâmica a base de óxido alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) texturizadas por laser de pulsos ultracurtos, no torneamento de ferro fundido cinzento FC250 (que gera cavaco curto) e aço inoxidável martensítico VSM13 (que gera cavaco longo). Para tanto, foram fabricadas texturas retas na superfície de saída das ferramentas e paralelas a aresta principal de corte. As texturas foram caracterizadas por microscópio óptica 3D. Foram monitoradas a força de usinagem ( $F_u$ ) no ensaio de torneamento, a rugosidade (parâmetros  $R_a$  e  $R_z$ ) e a circularidade das peças usinadas. As variáveis de entrada alteradas foram a ferramenta (referência e texturizada) e o avanço (0,20 e 0,25 mm/volta). Também foi realizado ensaio tribológico de microabrasão no material cerâmico de referência e texturizado. Os resultados mostraram diferença significativa na força de usinagem entre as ferramentas no torneamento do FC250. A ferramenta texturizada proporcionou  $F_u$  em média 41 N maior. Com relação ao VSM13, a única variável que influenciou significativamente a  $F_u$  foi o avanço. O aumento desta variável significou um aumento médio de 166 N. Quanto aos desvios de rugosidade e circularidade, a única variável que influenciou as respostas foi o avanço. Considerando o ensaio de microabrasão, a superfície de referência apresentou resistência ao desgaste ( $K^{-1}$ ) 32% maior do que a texturizada. De maneira geral, a ferramenta texturizada não superou os resultados da ferramenta de referência. Porém, ela foi menos sensível a influência do avanço para ambos materiais de peça avaliados. No ensaio tribológico, a ranhura serviu de depósito de abrasivo, diminuindo a resistência ao desgaste.

**Palavras-chave:** Texturização. Laser de pulsos ultracurtos. Cerâmica. Força de usinagem. Rugosidade. Circularidade. Resistência ao desgaste.

## ABSTRACT

This work aims to evaluate the performance of ceramic cutting tools based on aluminium oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) textured by ultrashort pulse laser, in turning grey cast iron FC250 (short chip) and martensitic stainless steel VSM13 (long chip). For this purpose, straight textures on the rake face of cutting tools and parallel to the main cutting edge were manufactured. The textures were characterized in a 3D optical microscope. Machining force ( $F_u$ ) was measured in the turning test, as well as the surface roughness (Ra and Rz parameters) and the circularity of the workpiece were evaluated. The changed input variables were tool (reference and textured) and feed rate (0.20 and 0.25 mm/rev). Microabrasion tribological tests were also performed with reference and textured ceramic material. The results showed a significant difference between tools in FC250 turning. Textured cutting tool provided an average  $F_u$  41 N greater than the reference. Considering VSM13, only the feed rate significantly influenced  $F_u$ . Increasing the feed rate implies  $F_u$  on average 166 N greater. As for surface roughness and circularity deviation, only the feed rate influenced the output variables. Finally, in the microabrasion test, the reference surface showed wear resistance ( $K^{-1}$ ) 32% greater than the textured one. In general, the textured tool did not outperform the reference tool. However, it was less sensitive to the feed rate influence for both evaluated workpiece materials. The grooves function as an abrasive reservoir in the tribological test, decreasing the wear resistance.

**Keywords:** Texturing. Ultrashort pulse laser. Ceramic. Machining Force. Surface roughness. Circularity. Wear resistance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura da ferramenta cerâmica <i>whisker</i> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC (30% vol.) .....	8
Figura 2 – Barras impressas com tinta C2M em que foi realizada secagem com ar quente entre as camadas de impressão, uma das técnicas de texturização por adição de materiais.....	10
Figura 3 – Exemplos de uma amostra de material texturizada. (a) Texturização através da utilização de rebolos; (b) Impressão por microcontato, etapa de mascaramento previa a texturização química/eletroquímica .....	11
Figura 4 – Inserto cerâmico texturizado a laser.....	11
Figura 5 – Exemplos de uma amostra de aço texturizada por texturização eletroquímica sem máscara (MECT – Maskless electrochemical texturing) .....	12
Figura 6 – Microcunhagem de Aço DIN 100Cr6.....	13
Figura 7 – Feixe de laser com característica Gaussiana, ênfase no modo TEM <sub>00</sub> ...	17
Figura 8 – Arestas de corte texturizadas: (a) Distância de 100 µm da aresta principal de corte com passo 95 µm; (b) Distância de 200 µm da aresta principal de corte com passo 65 µm; (c) Distância de 300 µm da aresta principal de corte com passo 60 µm; (d) Distância de 400 µm da aresta principal de corte com passo 60 µm .....	20
Figura 9 – Textura perpendicular à direção de saída do cavaco.....	21
Figura 10 – Fabricação de micro ranhuras na superfície de saída do inserto de metal duro através de micro retificação com um disco de diamante com perfil V .....	21
Figura 11 – Textura perpendicular à direção de saída do cavaco.....	22
Figura 12 – (a) amostra A1 (densidade da textura de 2%); (b) amostra A3 (densidade da textura de 10%); (c) amostra A5 (densidade da textura de 30%); (d) amostra B1 (diâmetro da calota de 40 µm); (e) amostra B5 (diâmetro da calota de 200 µm); (f) amostra B6 (diâmetro da calota de 300 µm) .....	23
Figura 13 – Área de contato numa superfície levemente carregada ( $A_r \ll A$ ).....	24
Figura 14 – Área de contato numa superfície com cargas elevadas ( $A_r = A$ ) .....	24
Figura 15 – Três tipos de regime de atrito sólido .....	25

Figura 16 – O modelo de distribuição de tensão na superfície de saída da ferramenta proposto por Zorev .....	26
Figura 17 – Círculo de Merchant.....	27
Figura 18 – Atividade científica e técnica envolvida na criação da engenharia da superfície.....	29
Figura 19 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte .....	30
Figura 20 – Diagrama de mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura .....	31
Figura 21 – Desgaste abrasivo. (a) Dois corpos; (b) Três corpos .....	32
Figura 22 – Superfície desgastada por microabrasão a dois corpos (2C) em amostra de aço ferramenta temperado e revenido. Abrasivo diamante (3 $\mu$ m) - MEV.....	35
Figura 23 – Superfície desgastada por microabrasão a três corpos (3C) em amostra de aço ferramenta temperado e revenido. Abrasivo SiC - MEV .....	35
Figura 24 – Período de running-in do ensaio de microabrasão de um aço superduplex UNS S32750 recozido.....	36
Figura 25 – Fatores que influenciam a rugosidade .....	37
Figura 26 – Esquema ilustrativo do funcionamento de um rugosímetro.....	37
Figura 27 – Diagrama esquemático das características da superfície .....	38
Figura 28 – Diagrama de Cálculo do parâmetro Ra .....	39
Figura 29 – Diagrama do cálculo do parâmetro Rz .....	39
Figura 30 – Representação da tolerância de circularidade .....	40
Figura 31 – Tolerância de circularidade de 0,03 mm .....	41
Figura 32 – Pastilha de cerâmica texturizada montada no suporte CSRNR 2525M 12-4 .....	43
Figura 33 – Ilustração de aspectos dimensionais da textura.....	43
Figura 34 – Ilustração da superfície texturizada para ensaio tribológico de microabrasão.....	44
Figura 35 – Microscópio óptico 3D, modelo CM Explorer (Mahr) .....	45

Figura 36 – Ilustração: (a) Regiões de avaliação; (b) Aspectos topográficos.....	46
Figura 37 – Regiões de avaliação dos aspectos dimensionais para amostra texturizada para ensaio tribológico .....	46
Figura 38 – Fixação da barra. (a) FC250 e indicação dos testes; (b) VSM13 indicação dos testes e batimento .....	48
Figura 39 – Torno CNC instrumentado .....	50
Figura 40 – Micrômetro e suporte para a medição da espessura dos cavacos.....	51
Figura 41 – Rugosidade. (a) Posição para a medição dos parâmetros de rugosidade na peça; (b) Rugosímetro modelo SurfTest SJ-210 (Mitutoyo). .....	52
Figura 42 – Máquina de desvio de forma MMQ 200 (Mahr) .....	52
Figura 43 – Ensaio de microabrasão. (a) Microabrasômetro; (b) Configuração esquemática do microabrasômetro .....	54
Figura 44 – Nikon Eclipse MA200 .....	55
Figura 45 – Difratoograma da ferramenta cerâmica KA30 .....	56
Figura 46 – Microscopia confocal. (a) Ferramenta de referência; (b) Ferramenta texturizada.....	57
Figura 47 – Perfil topográfico em V da textura .....	58
Figura 48 – Imagem em MEV da ranhura usinada a laser de femtossegundos. (a) Elétrons retroespalhado (BSED); (b) Elétrons secundários (ETD) .....	59
Figura 49 – Microscopia confocal da superfície texturizada para ensaio tribológico .	60
Figura 50 – Perfil topográfico em V da textura para a amostra referente ao ensaio tribológico .....	60
Figura 51 – Gráfico de efeito para $F_u$ no FC250. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço .....	62
Figura 52 – MEV-EDS da superfície de saída de ferramentas após torneamento do FC250. (a) Referência $f = 0,20$ mm/volta; (b) Texturizada $f = 0,20$ mm/volta; (c) Referência $f = 0,25$ mm/volta; (d) Texturizada $f = 0,25$ mm/volta.....	64

Figura 53 – Imagens termográficas ilustrativas do fluxo de cavaco. (a) Referência $f = 0,20$ mm/volta; (b) Referência $f = 0,25$ mm/volta; (c) Texturizada $f = 0,20$ mm/volta; (d) Texturizada $f = 0,25$ mm/volta .....	66
Figura 54 – Gráfico de efeito para temperatura no FC250. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço.....	67
Figura 55 – Gráfico de efeito para Ra no FC250. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço .....	69
Figura 56 – Gráfico de efeito para Rz no FC250. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço .....	71
Figura 57 – Gráfico de efeito para circularidade no FC250. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço.....	73
Figura 58 – Gráfico de efeito para Fu no VSM13. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço .....	75
Figura 59 – MEV-EDS da superfície de saída de ferramentas após torneamento do VSM13. (a) Referência $f = 0,20$ mm/volta; (b) Texturizada $f = 0,20$ mm/volta; (c) Referência $f = 0,25$ mm/volta; (d) Texturizada $f = 0,25$ mm/volta.....	77
Figura 60 – Cavaco do aço inoxidável martensítico (VSM13) com forma predominante emaranhado. (a) Referência $f = 0,20$ mm/volta; (b) Texturizada $f = 0,20$ mm/volta; (c) Referência $f = 0,25$ mm/volta; (d) Texturizada $f = 0,25$ mm/volta .....	79
Figura 61 – Gráfico de efeito para Rc no VSM13. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço .....	81
Figura 62 – Gráfico de efeito para Ra no VSM13. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço .....	83
Figura 63 – Gráfico de efeito para Ra no VSM13. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço .....	85
Figura 64 – Gráfico de efeito para circularidade no VSM13. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço.....	87
Figura 65 – MO das calotas formadas sobre a superfície de saída ( $A_\gamma$ ) das ferramentas cerâmicas. (a) Ferramenta de referência (sem textura); (b) Ferramenta texturizada	88

Figura 66 – Gráfico desgaste abrasivo ( $K^{-1}$ ) em função da distância deslizada (m) para a amostra de referência e texturizada .....	89
Figura 67 – Gráfico de efeitos da resistência ao desgaste microabrasivo ( $K^{-1}$ ), considerando o tratamento: Referência e Texturizada.....	90
Figura 68 – Imagens em MEV da calota de desgaste da amostra cerâmica. (a) Referência; (b) Texturizada.....	92
Figura 69 – Imagem em MEV da amostra cerâmica de referência com três áreas em destaque: centro, lateral e porção inferior da calota de desgaste .....	93
Figura 70 – Imagem em MEV amostra de referência. (a) Superfície de saída da ferramenta (plana); (b) Calota de desgaste região central .....	94
Figura 71 – Imagem em MEV/EDS amostra de referência, calota de desgaste, região central. (a) Imagem 1000x; (b) Mapa químico 1000X. (c) Imagem 5000x; (d) Mapa químico 5000X; (e) Imagem 10000x; (f) Mapa químico 10000X .....	95
Figura 72 – Imagem em MEV da amostra cerâmica texturizada com três áreas em destaque: centro, lateral e porção inferior da calota de desgaste .....	97
Figura 73 – Imagem em MEV amostra texturizada. (a) Superfície de saída da ferramenta (plana); (b) Calota de desgaste região central .....	98
Figura 74 – Imagem em MEV/EDS amostra texturizada, calota de desgaste, região central. (a) Imagem 1000x; (b) Mapa químico 1000X. (c) Imagem 5000x; (d) Mapa químico 5000X; (e) Imagem 10000x; (f) Mapa químico 10000X .....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores recomendados para os comprimentos de amostragem e de avaliação.....	39
Tabela 2 – Composição química do FC250 .....	47
Tabela 3 – Composição química do VSM13 .....	47
Tabela 4 – Matriz de experimentos para ensaio de usinagem no FC250 .....	49
Tabela 5 – Matriz de experimentos para ensaio de usinagem no VSM13 .....	49
Tabela 6 – Parâmetros para o ensaio de microabrasão.....	54
Tabela 7 – Estatística descritiva dos aspectos dimensionais da textura, unidade dimensional em $\mu\text{m}$ .....	58
Tabela 8 – Estatística descritiva dos aspectos dimensionais da textura para amostra em ensaio tribológico, unidade dimensional em $\mu\text{m}$ .....	60
Tabela 9 – Dados de $F_u$ para FC250 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em N.....	61
Tabela 10 – ANOVA para os resultados de $F_u$ no FC250.....	61
Tabela 11 – Valores médios de temperatura para FC250 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em $^{\circ}\text{C}$ .....	65
Tabela 12 – ANOVA para os resultados de temperatura no FC250.....	66
Tabela 13 – Dados de $R_a$ para FC250 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em $\mu\text{m}$ .....	68
Tabela 14 – ANOVA para os resultados de $R_a$ no FC250. ....	69
Tabela 15 – Dados de $R_z$ para FC250 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em $\mu\text{m}$ .....	70
Tabela 16 – ANOVA para os resultados de $R_z$ no FC250 .....	71
Tabela 17 – Dados de circularidade para FC250 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em $\mu\text{m}$ .....	72
Tabela 18 – ANOVA para os resultados de circularidade no FC250.....	73

Tabela 19 – Dados de $F_u$ para VSM13 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em N .....	74
Tabela 20 – ANOVA para os resultados de $F_u$ no VSM13.....	75
Tabela 21 – Dados de grau de recalque para VSM13 considerando a variação da ferramenta e avanço .....	79
Tabela 22 – ANOVA para os resultados de $R_c$ no VSM13 .....	80
Tabela 23 – Dados de $R_a$ para VSM13 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em $\mu\text{m}$ . .....	82
Tabela 24 – ANOVA para os resultados de $R_a$ no VSM13 .....	82
Tabela 25 – Dados de $R_z$ para VSM13 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em $\mu\text{m}$ .....	84
Tabela 26 – ANOVA para os resultados de $R_z$ no VSM13 .....	84
Tabela 27 – Dados de circularidade para VSM13 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em $\mu\text{m}$ .....	86
Tabela 28 – ANOVA para os resultados de circularidade no VSM13.....	86
Tabela 29 – Diâmetro médio da calota ( $b_{\text{médio}}$ ) e resistência média ao desgaste microabrasivo ( $K_{\text{médio}}^{-1}$ ) para cada tipo de ferramenta ensaiada (Texturizada ou sem textura) .....	89
Tabela 30 – ANOVA para os resultados de desgaste abrasivo .....	90

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de contato aparente
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina ou óxido de alumínio
Ar	Áreas de contato real
$a_p$	Profundidade de corte
A $\gamma$	Superfície de saída da ferramenta de corte
$b$	Largura de corte
eV	Elétron-volt
F	Razão entre a variância do efeito e do resíduo
$f$	Avanço da ferramenta
$F_c$	Força de corte
$F_f$	Força de avanço
$F_u$	Força de usinagem
$h$	Espessura nominal de corte
K	Coefficiente de desgaste dimensional
K <sup>-1</sup>	Resistência ao desgaste abrasivo
L	Distância total deslizada
N	Número de observações
R	Raio
Ra	Parâmetro de rugosidade Ra
Rc	Grau de recalque
Rz	Parâmetro de rugosidade Rz
S	Distância deslizada
SiC	Carboneto de silício
TEM <sub>00</sub>	Feixe Gaussiano Fundamental
V	Volume desgastado (V)
$V_c$	Velocidade de corte
W	Carga normal sobre o contato
ZrO <sub>2</sub>	Zircônia ou óxido de zircônio
$\emptyset$	Ângulo de cisalhamento
$\gamma_0$	Ângulo de saída

## LISTA DE SIGLAS

ANOVA	Análise de variância
BSED	Detector em elétrons retroespelhado
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DRX	Difração por raio-X
ETD	Detector de elétrons secundários
GL	Grau de liberdade
HSS	Aço rápido
HV	Número de dureza Vickers
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LBM	Laser beam machining
LSC	Círculo obtido por mínimos quadrados
LST	Texturização de superfície a laser
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
QM	Quadrado médio ou variância
SQ	Somatório dos quadrados dos resíduos
ZTA	Zona termicamente afetada

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVOS .....	3
2.1 OBJETIVO GERAL .....	3
2.1.1 Objetivos específicos .....	3
3 REVISÃO DA LITERATURA .....	4
3.1 Material Cerâmico.....	4
3.1.1 Cerâmicas aplicadas a usinagem.....	6
3.2. Texturização .....	9
3.2.1 Laser e suas aplicações.....	14
3.2.2 Laser de pulsos ultracurtos .....	15
3.2.3 Mecanismo de ablação .....	17
3.2.4 Trabalhos relacionados .....	19
3.3 Usinagem: Interface cavaco-ferramenta .....	24
3.3.1 Esforços de corte .....	26
3.3.2 Desgaste .....	28
3.4 Ensaio tribológico de microabrasão .....	33
3.5 Desvios micro e macrogeométricos .....	36
3.5.1 Rugosidade .....	36
3.5.2 Desvios macrogeométricos .....	40
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	42
4.1 Especificação e texturização das ferramentas de corte.....	42
4.2 Caracterização das texturas por microscopia óptica 3D.....	44
4.3 Metodologia para Ensaio de Usinagem .....	47
4.4 Metodologia para medição de desvios de rugosidade e de circularidade.....	51
4.5 Metodologia para realização do ensaio de microabrasão.....	53

5 RESULTADOS .....	56
5.1 Caracterização da ferramenta de corte.....	56
5.1.1 Caracterização da ferramenta por difração de raios-X (DRX).....	56
5.1.2 Caracterização dimensional da textura .....	57
5.2 Resultados de Usinagem do FC250 .....	61
5.2.1 Força de usinagem no FC250 .....	61
5.2.2 Temperatura na usinagem do FC250.....	65
5.2.3 Rugosidade no FC250 .....	68
5.2.4 Circularidade no FC250 .....	72
5.3 Resultados de Usinagem no VSM13 .....	74
5.3.1 Força de usinagem no VSM13.....	74
5.3.2 Grau de recalque no VSM13.....	78
5.3.3 Rugosidade no VSM13 .....	82
5.3.4 Circularidade no VSM13 .....	86
5.4 Ensaio de desgaste microabrasivo .....	88
6 CONCLUSÃO.....	101
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	103
REFERÊNCIAS.....	104

## 1 INTRODUÇÃO

De maneira geral, os materiais cerâmicos foram os primeiros materiais manipulados pelo homem. Os principais marcos históricos são os artefatos de argila e as louças de barro (5000 a.C.), utilização do torno oleiro (em 3500 a.C.) e a porcelana Chinesa (1000 a.C.) (NORTON, 1952; REED, 1995).

Do ponto de vista químico, as cerâmicas podem ser definidas como compósitos formados de elementos metálicos e não metálicos, geralmente, encontrados na forma de óxidos, nitretos e carbonetos, com ligações atômicas podendo ser desde predominantemente iônicas ou covalentes, bem como uma combinação dos dois tipos (CALLISTER, 2012).

Otitoju et al. (2020) mencionam que as cerâmicas podem ser divididas em dois grupos: tradicionais e avançadas. As cerâmicas tradicionais são materiais de fácil obtenção e com aplicações tradicionais (fabricação de vidros, tijolos, refratários). Enquanto as cerâmicas avançadas possuem aplicações voltadas para a indústria e tecnologia, como por exemplo, isolantes, piezoelétricos, implantes, ferramentas, componentes mecânicos entre outros.

Segundo Machado et al. (2015) uma das aplicações das cerâmicas avançadas é na utilização como ferramentas de corte para a usinagem. Elas são utilizadas em operações de desbaste e acabamento sendo aplicadas, principalmente, no corte contínuo de aços endurecido, superligas e ferros fundidos, envolvendo altas taxas de remoção de material, com altos valores de velocidade de corte.

Bobzin (2017) cita o crescimento de materiais cerâmicos e ultraduros na participação do mercado global de ferramentas de corte. Segundo o autor, a razão para a mudança está relacionada aos materiais de peça (maior resistência mecânica) e às condições de corte (maiores taxas de remoção de material ou maior produtividade).

Os insertos cerâmicos são divididos em dois grupos: a base de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e a base de Nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) (SHAW, 2005). A ferramenta cerâmica utilizada neste trabalho é feita a partir de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com adição de zircônia ( $\text{ZrO}_2$ ), cuja a finalidade é de aumentar a tenacidade através de um mecanismo de transformação de fase, no qual a zircônia com estrutura tetragonal e metaestável se transforma em monocíclica estável, gerando uma grande variação de volume, que por consequência,

faz surgir tensões compressivas que dificultam a propagação das trincas (KOMANDURI; SAMANTA, 1989).

Um problema muito comum que ocorre em ferramentas de corte utilizadas para usinagem de metais endurecidos é o desgaste prematuro gerado pelo atrito envolvido no processo de corte, culminando em perda de produtividade (SUGIHARA; ENOMOTO, 2009). Estudos mostram que uma forma efetiva de aumentar a vida de ferramentas de corte pode ser alcançada através de técnicas de texturização na superfície de saída ( $A_v$ ) de insertos. Através desta técnica é possível reduzir o atrito no contato cavaco-ferramenta devido a mudanças no tribo-sistema, e desta forma, reduzir os esforços de corte e o desgaste da ferramenta (KAWASEGI et al., 2009).

Um das técnicas que tem se mostrado promissora para fabricação de texturas, chama-se texturização de superfícies a laser. Neste caso, destaca-se os lasers de pulsos ultracurtos, que podem ter equipamentos que emitem pulsos da ordem de femtossegundos ( $10^{-15}$  s). Devido a breve duração do pulso, a densidade de potência é elevada ( $10^{12}$  a  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>), o que torna possível remover material com precisão, sem gerar zona termicamente afetada, danos microestruturais ou trincas de origem térmica (WANG et al., 2010; SAMAD et al., 2012).

Youqiang et al. (2013) citam que o sucesso do desempenho de uma superfície texturizada depende das características dimensionais da textura, bem como da sua distribuição sobre a superfície. Todavia, os materiais que escorregam sobre essas superfícies também podem influenciar. O ferro fundido cinzento caracteriza-se por ser um material frágil, enquanto o aço inoxidável um material dúctil. O primeiro tem grande relevância para a indústria automotiva e para fabricação de máquinas. O segundo para a indústria de petróleo, alcooleira e mecânica. Segundo Machado et al. (2021), existe lacuna de estudos científicos envolvendo estes materiais de peças e ferramentas de usinagem texturizadas.

Em usinagem o objetivo principal das texturas é de reduzir o atrito na interface cavaco-ferramenta durante o processo de corte com influência sobre os esforços de corte e, conseqüentemente, sobre o desgaste da ferramenta. Segundo Gómez (2014), o ensaio tribológico de microabrasão é utilizado para estudar o desgaste abrasivo em escala micrométrica e pode ser um método útil para análises preliminares de resistência ao desgaste em ferramentas de corte para usinagem. Logo, justifica-se realizar ensaios de força de usinagem e tribológicos, para avaliar o desempenho de superfícies texturizadas.

## 2 OBJETIVOS

Neste capítulo apresenta-se os objetivos geral e específicos.

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho consiste em avaliar o desempenho de ferramentas de corte cerâmica a base de óxido alumínio, texturizadas por laser de pulsos ultracurtos, no torneamento do ferro fundido cinzento FC250 e do aço inoxidável martensítico VSM13.

#### 2.1.1 Objetivos específicos

- Texturizar a superfície de saída ( $A_\gamma$ ) da ferramenta cerâmica por laser de pulso ultracurtos ( $10^{-15}$  s);
- Caracterizar as texturas e através de microscopia óptica 2D e 3D;
- Avaliar a força de usinagem através do monitoramento das componentes ortogonais dos esforços de corte durante o ensaio de torneamento;
- Avaliar a qualidade da superfície usinada através do monitoramento dos parâmetros de rugosidade Ra e Rz;
- Avaliar os desvios macrogeométricos de circularidade;
- Caracterizar o desempenho tribológico por meio da avaliação da resistência ao desgaste microabrasivo, bem como evidenciar por MEV os micromecanismos de desgaste.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

O item aborda material cerâmico, texturização, usinagem, ensaio tribológico de microabrasão, desvio micro e macrogeométrico.

#### 3.1 MATERIAL CERÂMICO

Segundo Otitoju et al. (2020) os materiais cerâmicos podem ser divididos em: tradicionais e avançados. As cerâmicas tradicionais existem há mais de dez mil anos. Foi o primeiro material produzido pelo homem. São materiais a base de argila, como tijolos, porcelanas entre outros. Sendo que o termo cerâmico tem origem na palavra grega *keramikos*, cujo o significado é “matéria queimada”, indicando que para conseguir as propriedades mecânicas desejadas é necessário que esse material passe por um tratamento térmico, chamado de sinterização (CALLISTER, 2012). As cerâmicas avançadas podem ser divididas em funcionais e estruturais e as suas aplicações serão descritas a seguir (RAHAMAN, 2003).

Os cerâmicos são compostos formados de elementos metálicos e não metálicos. As suas ligações químicas podem ser iônicas, covalentes ou uma combinação de ambas (CALLISTER, 2012; OTITOJU et al., 2020). Como exemplo de materiais cerâmicos, pode-se citar: silicatos (caulinita,  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ); óxidos (alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e zircônia,  $\text{ZrO}_2$ ); carbonetos (carboneto de silício,  $\text{SiC}$ ); nitretos (nitreto de silício,  $(\text{Si}_3\text{N}_4)$ ) (RAHAMAN, 2003).

Estruturalmente, os materiais cerâmicos possuem uma organização atômica que se repete com a distância, o que permite formar uma estrutura cristalina. A maior parte dos cerâmicos são policristalinos. Eles são compostos de um grande número de pequenos cristais, ou grãos, separados uns dos outros por contornos de grãos (RAHAMAN, 2003).

Existem dois tipos de estruturas que causam um profundo efeito nas propriedades. A primeira está na escala atômica: o tipo de ligação e a estrutura cristalina. O segundo está em uma escala um pouco maior: a microestrutura, que se refere a natureza, quantidade e distribuição dos elementos estruturais ou fases na cerâmica. É útil saber a diferença entre as propriedades intrínsecas de um material e as propriedades que dependem da microestrutura. As propriedades intrínsecas são determinadas pela estrutura na escala atômica e são propriedades que não são

suscetíveis a mudanças significativas por modificação da microestrutura, por exemplo, propriedades como o ponto de fusão, módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmico, se o material é magnético, ferroelétrico ou semicondutor. Em contrapartida, muitas das propriedades críticas para as aplicações de engenharia de materiais são fortemente dependentes da microestrutura, por exemplo, resistência mecânica, constante dielétrica e condutividade elétrica (RAHAMAN, 2003).

As cerâmicas geralmente têm pontos de fusão elevados e, portanto, são geralmente descritas como refratárias, além disso, os cerâmicos possuem alta dureza e conseqüentemente são frágeis, além de serem quimicamente inertes. As aplicações funcionais das cerâmicas estão na área elétrica, magnética, eletrônica e óptica. As estruturais aparecem na indústria de ferramentas de corte, aeroespacial e automobilística. Normalmente, para uma determinada aplicação uma propriedade pode ser mais relevante do que outra, todavia em cerâmicas avançadas as combinações de propriedades devem ser consideradas (RAHAMAN, 2003).

As estruturas químicas das cerâmicas avançadas são claras e simples com alta pureza. Além disso, são feitas a partir elementos intencionalmente calculados, o que significa que as matérias-primas estão sob controle. Portanto, a microestrutura das cerâmicas avançadas é geralmente fina e uniforme (OTITOJU et al., 2020).

As cerâmicas são sinterizadas em temperaturas elevadas, em torno 1200 a 2200°C. E para executar o tratamento térmico existem muitas tecnologias, tais quais, prensagem a quente e prensagem isostática, fazendo uso de atmosfera protetora ou a vácuo, garantindo corpos densos (GERMAN, 1996).

Cerâmicas avançadas têm melhores desempenhos em qualidade, bem como novas aplicações que as tradicionais não têm. Elas têm várias propriedades físicas e mecânicas, incluindo alta dureza, alta resistência, resistência ao choque térmico, resistência ao desgaste, resistência à corrosão e resistência a alta temperatura. Também têm grande potencial para uso em áreas do magnetismo, transferência de calor, eletricidade, óptica, biologia, química e outras aplicações (OTITOJU et al., 2020).

### 3.1.1 Cerâmicas aplicadas a usinagem

Uma das aplicações das cerâmicas avançadas estruturais é como ferramentas de corte para a usinagem, sendo muito utilizadas na usinagem de materiais endurecidos e superligas (MACHADO et al., 2015).

O mercado global de ferramentas de corte aplicadas para usinagem de materiais metálicos foi de aproximadamente US\$ 25 bilhões em 2019. E a previsão é de crescimento a uma taxa de mais de 8% até 2026. O crescimento previsto no mercado pode ser atribuído ao aumento da demanda da indústria aeroespacial e automotiva (TECHSCIRESEARCH, 2021).

Segundo algumas projeções, os insertos cerâmicos mostram um crescimento dentro do grupo de ferramentas de corte, que se justifica pelos avanços no processo de fabricação por metalurgia do pó, materiais de peça com maior resistência mecânica e maiores taxas de remoção de material (DEDALUS CONSULTING, 2011; BOBZIN, 2017).

Estima-se que as ferramentas cerâmicas vêm sendo utilizadas principalmente por fabricantes de autopeças (36%), serviços terceirizados de usinagem (25%) e empresas da área de fundição (16%), setores de ferramentaria (10%) e montadoras (9%). Sendo que as cerâmicas à base de alumina ( $Al_2O_3$ ) representam 34% desse mercado (MÁQUINAS E METAIS, 2012).

As ferramentas de corte de cerâmica têm propriedades químicas e mecânicas exclusivas, tais como, elevada dureza em altas temperaturas, o que garante resistência ao desgaste, elevada resistência a compressão e estabilidade química. Essas ferramentas podem oferecer maiores taxas de remoção de metal. Quando aplicadas corretamente, as cerâmicas podem fornecer ao engenheiro de manufatura um meio de reduzir os custos de usinagem e aumentar a produtividade. As vantagens de usar ferramentas de corte de cerâmica são que os materiais endurecidos podem ser usinados em uma única etapa, reduzindo assim o tempo de usinagem que seria gasto com etapa de acabamento (KUMAR; DURAI; SORNAKUMAR, 2006).

Como dito anteriormente, esta classe de pastilha é muito utilizada na usinagem de aços de alta dureza, principalmente se o corte for contínuo, como o caso do torneamento. Porém, por não apresentarem alta tenacidade, essas pastilhas não possuem quebra cavaco, o que impede sua utilização na usinagem de aços carbono comuns e aços de baixa liga (MACHADO et al., 2015).

As ferramentas de corte de material cerâmico podem ser divididas em dois grandes grupos: cerâmicas a base de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e cerâmicas a base de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) (SHAW, 2005).

As cerâmicas a base de alumina, são divididas em cerâmicas puras (muitas vezes chamada de cerâmicas brancas), cerâmicas mistas e reforçadas com *whiskers* (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). As cerâmicas brancas são fabricadas a partir de pós finos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com adições de outras fases como  $\text{MgO}$  e  $\text{ZrO}_2$  com a intenção de melhorar a tenacidade à fratura, uma vez que elas também se caracterizam por serem frágeis (MACHADO et al., 2015).

Segundo Trent e Wright (2000), ferramentas cerâmicas a base de alumina, podem usinar aços e ferros fundidos com velocidades de corte muito mais altas (600 a 750 m/min) do que ferramentas de metal duro, apesar da baixa tenacidade à fratura, em torno de  $4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  contra  $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

As velocidades corte conseguida com ferramentas de alumina, que são três a quatro vezes maiores do que as normalmente usadas com ferramentas de metal duro, representam um aumento na taxa de remoção de metal tão grande quanto aquelas alcançadas pelos aços rápidos e pelos metais duros, quando surgiram. No entanto, apesar dos esforços de entusiastas dedicados para introduzir essas ferramentas em grande escala, os números em uso são apenas uma porcentagem muito pequena das aplicações, quando comparadas com ferramentas de metal duro. Seu principal uso é no corte contínuo de ferro fundido cinzento, com elevado acabamento superficial. Em revestimentos de embreagem e discos de freios de automóveis, estas pastilhas estão sendo usadas com velocidades de corte de até 600 m/min para dar acabamento, eliminando a operação subsequente de retificação (SHAW, 2005).

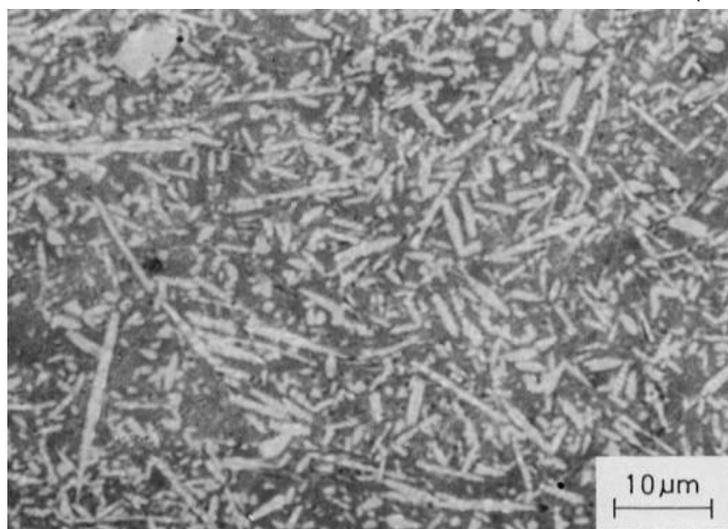
As cerâmicas mistas são formadas, além da alumina, por carboneto de titânio (TiC) ou nitreto de titânio (TiN), elas possuem estabilidade química um pouco pior e dureza a quente um pouco melhor, quando comparadas com a cerâmica branca (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2014). Essas ferramentas são usadas principalmente na usinagem em alta velocidade de ferro fundido e aços endurecidos. A sua gama aplicação tende a ser maior do que as cerâmicas brancas, por causa da maior resistência ao desgaste e maior condutividade térmica, resultado da adição do TiC (TRENT; WRIGHT, 2000).

A alumina reforçada com fibra é composta por adições de carboneto de silício ( $\text{SiC}_w$ ), que quando está presente na matriz cerâmica a base de alumina, é chamada

de *whiskers*, ver Figura 1. Estes carbonetos são adicionados em até 20% na alumina, eles possuem um formato cilíndrico com um diâmetro de 0,5 a 6  $\mu\text{m}$  e comprimento de 10 a 80  $\mu\text{m}$ . O mecanismo pelo qual a cerâmica ganha mais tenacidade com adição de *whiskers*, se dá pela separação deste elemento dentro da matriz, quando uma trinca se propaga. Um outro mecanismo é quando a trinca encontra a fibra em seu caminho e não consegue atravessá-lo, precisando mudar de direção, devido a sua alta resistência mecânica. Ambos os mecanismos, envolvem absorção de energia de fratura (KUMAR; DURAI; SORNAKUMAR, 2006; MACHADO et al., 2015).

Estes insertos também possuem maior resistência ao choque térmico, essa característica é adquirida devido as propriedades de condutividade térmica do SiC em relação a alumina (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2014). As propriedades adquiridas pela ferramenta de cerâmica quando adicionados este material são consideradas excepcionais, com aplicações na usinagem de diversos materiais endurecidos, como, aços duros, aços inoxidáveis e principalmente as superligas de níquel (KUMAR; PATEL, 2019).

Figura 1 – Estrutura da ferramenta cerâmica *whisker*  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC (30% vol.)



Fonte: Trent e Wright (2000).

Falando agora do segundo grupo de cerâmicas. As cerâmicas a base de Nitreto de Silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) são o segundo grupo de material de ferramenta de corte cerâmico. Estas são formadas por cristais de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  com uma fase intergranular de  $\text{SiO}_2$  que são sinterizados na presença de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  e outros. Estes elementos proporcionaram excelentes resultados na usinagem de ligas de níquel e ferros fundidos. É necessário citar, que estas pastilhas não são recomendadas para

usinagem de aços, pois em altas temperaturas estes elementos possuem uma grande interação com o ferro (BULJAN; SARIN, 1985).

Um dos produtos desse grupo de cerâmicas é conhecido no mercado como 'sialons', e tem sido intensamente investigado por causa de suas excelentes propriedades como materiais refratários de alta resistência. Desde 1976 seu uso como ferramentas de corte tem sido explorado e obtido sucesso em diversas aplicações (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2014). Sialons (Si-Al-O-N) são materiais à base de nitreto de silício com adições de óxido de alumínio. O próprio nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) tem propriedades úteis, incluindo alta dureza (2000 HV), resistência à flexão melhor do que a da alumina (900 MPa) e um baixo coeficiente de expansão térmica ( $3,2 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), proporcionando boa resistência ao choque térmico (TRENT; WRIGHT, 2000). A adição de óxido de alumínio nas ferramentas desse grupo diminui a afinidade química do ferro com os materiais desta pastilha, tornando assim possível a aplicação desta ferramenta em aços (MACHADO et al., 2015).

As cerâmicas a base de nitreto de silício possuem uma boa tenacidade quando comparadas com as cerâmicas a base de alumina. Graças a esta propriedade é possível utilizar estas ferramentas no processo de fresamento, sendo capaz de suportar os impactos causados pelo corte intermitente (MACHADO et al., 2015).

Esse material de ferramenta também é muito utilizado na usinagem de ligas aeroespaciais a base de níquel. O uso nesta aplicação é um significativo reconhecimento de confiabilidade no material da ferramenta, uma vez que a falha da ferramenta pode resultar no descarte de componentes muito caros (TRENT; WRIGHT, 2000).

### 3.2. TEXTURIZAÇÃO

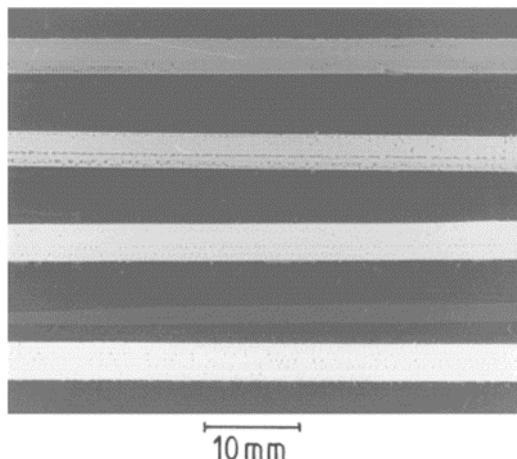
A texturização é aplicada desde os tempos antigos, há relatos que trabalhadores chineses utilizavam padrões estriados ou covinhas nas solas dos sapatos para ajudá-los a trabalhar em solo lamacento e escorregadio. Na idade contemporânea utiliza-se o conhecimento sobre tribologia para gerar texturas sofisticadas na superfície para controlar o atrito/aderência nos pneus dos automóveis em função das condições da pista. Além desta aplicação, na engenharia utiliza-se texturas para que as superfícies tenham direcionalidade, caminhos preferenciais de

fluxo de fluido, controle da área real de contato e da taxa de fluxo para promover a rápida transferência de calor (GACHOT et al. 2017).

As técnicas de texturização podem ser divididas em três, são elas: técnicas baseadas na adição de materiais, técnicas baseadas na remoção de material e técnicas baseadas em movimentação de materiais (deformação plástica) (GACHOT et al. 2017).

As técnicas baseadas na adição de material consistem na deposição de revestimentos padronizados em regiões previamente selecionadas, esta deposição pode ser feita por meio de diversos processos, como, eletrodeposição, deposição de filmes cerâmicos, impressão 3D de revestimento resistente ao desgaste e outros. Essas técnicas irão promover uma série de características em relevo na superfície, elas podem ser usadas para controlar a área de contato ou promover uma rápida transferência de calor criando canais direcionais, que podem influenciar nas propriedades tribológicas, ver Figura 2 (GACHOT et al. 2017).

Figura 2 – Barras impressas com tinta C2M em que foi realizada secagem com ar quente entre as camadas de impressão, uma das técnicas de texturização por adição de materiais

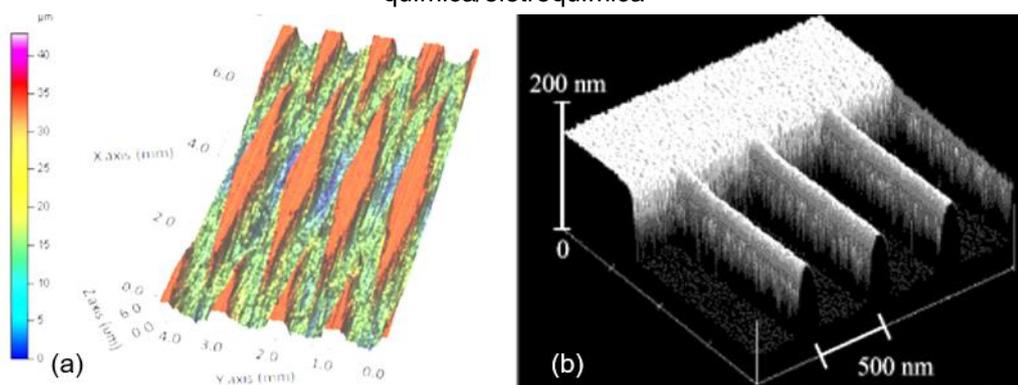


Fonte: Adaptado de Song, Edirisinghe e Evans (1999).

As técnicas baseadas na remoção de material são as mais utilizadas, saliências de vários tamanhos são possíveis de serem fabricadas, com isso podem ser mais resistentes ao cisalhamento e capazes de armazenar lubrificantes. Essas ranhuras fabricadas na superfície do material podem ter diversos formatos, podem ser contínuas ou descontínuas. As técnicas mais utilizadas são: texturização a laser, fonte de elétrons, fonte de íons, química/eletroquímica e brunimento (GACHOT et al. 2017). Dois exemplos de textura processada podem ser vistos na Figura 3.

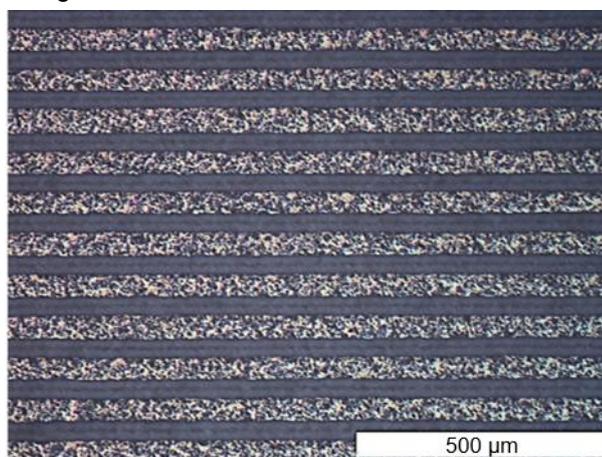
Neste trabalho um laser foi utilizado para promover a texturização. A usinagem por feixe de laser (Laser Beam Machining – LBM) é considerado um dos processos avançados de usinagem, do tipo sem contato, com base em energia térmica. É amplamente utilizado nas indústrias e pode ser aplicado em qualquer material a depender do tipo de laser. O feixe de laser é focado para remover o material indesejado por fusão e/ou evaporação. O LBM tem amplas aplicações em campos dos setores automotivo, indústria aeronáutica, indústria eletrônica, estruturas civis, setor nuclear e eletrodomésticos (DUBEY; YADAVA, 2008). Em se tratando de superfície texturizada a laser (Laser Surface Texturing – LST), a aplicação tem sido para promover alterações tribológicas, ópticas, mecânicas e bioquímicas. Na Figura 4 tem-se um exemplo de uma superfície de ferramenta cerâmica texturizada.

Figura 3 – Exemplos de uma amostra de material texturizado. (a) Texturização através da utilização de rebolos; (b) Impressão por microcontato, etapa de mascaramento previa a texturização química/eletroquímica



Fonte: Adaptado de Gachot et al. (2017).

Figura 4 – Inseto cerâmico texturizado a laser



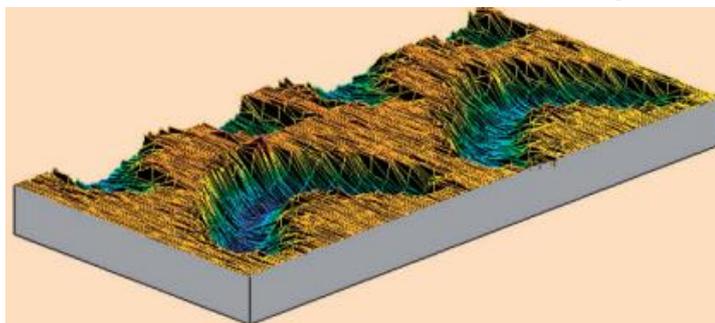
Fonte: Melo (2018).

As duas principais desvantagens da texturização a laser são: velocidade de texturização baixa, pois o tempo total de texturização para áreas grandes pode ser longo, e fusão ou refusão que podem introduzir tensões residuais e microfissuras, que sob fadiga de baixo ciclo podem causar fratura (GACHOT et al., 2017). Todavia, os sistemas de laser estão em constante atualização e especialistas da área minimizam os problemas de baixa velocidade com fontes de maior potência.

Uma técnica popular utilizada em texturização é a usinagem química ou eletroquímica que resultam na remoção seletiva de material em regiões desprotegidas, neste tipo de texturização as áreas ou os padrões a serem gravados são expostos a um agente químico de gravação, que pode ser ácido ou alcalino. As áreas que não devem ser gravadas são protegidas com uma máscara resistente à corrosão. Existe várias técnicas para fazer a proteção desta superfície, como por exemplo podemos citar a fotolitografia, impressão a jato de tinta, etc. (COSTA; HUTCHINGS, 2015; GACHOT et al., 2017).

Costa e Hutchings (2015) citam um método de texturização eletroquímico chamado de texturização eletroquímica sem máscara (MECT), ver Figura 5. Segundo os autores, esta técnica possui a vantagem de não precisar da aplicação de agentes químicos de gravação (mascaramento prévio). Seu funcionamento consiste na utilização de uma única ferramenta de cátodo, onde um padrão a textura é incorporado através de um padrão de perfurações.

Figura 5 – Exemplos de uma amostra de aço texturizada por texturização eletroquímica sem máscara (MECT – Maskless electrochemical texturing)



Fonte: Costa e Hutchings (2015).

O brunimento é um processo de usinagem que utiliza rebolos deslizantes com movimentos rotativos e alternativos. É o método padrão para o acabamento de furos de cilindro em motores alternativos de combustão interna. A topografia da superfície é composta por áreas planas com asperezas cruzadas e um padrão de ranhura bem

definido de vales. O brunimento produz uma superfície com capacidade intrínseca de reter lubrificante e um período de adaptação tribológica dos pares em contato mais curto (BAHRE; SHMITT; MOOS, 2012).

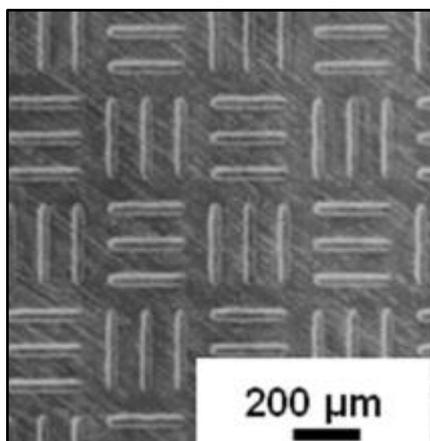
As técnicas utilizadas na deformação plástica do material causam a mudança na topografia da superfície do material. Uma destas técnicas é chamada de jateamento. Ela consiste no lançamento de partículas duras na superfície em alta velocidade, causando danos por impacto e rugosidade. A mudança na estrutura da superfície é atribuída à deformação plástica. É difícil controlar a textura com precisão devido ao grande número de parâmetros do processo, como tamanho, forma, velocidade e dureza do abrasivo. Além disso, o abrasivo pode apenas formar texturas aleatórias (PAWELSKI et al., 1994).

A gravação em relevo envolve a deformação do material usando uma ferramenta com o negativo do padrão a ser impresso na superfície. Normalmente, envolve o aquecimento da superfície a ser texturizada, para reduzir a necessidade de ferramentas de estampagem muito duras (HEUBERGER et al., 2002).

Um processo que usa esse princípio é chamado de microcunhagem. Esta técnica é bem desenvolvida em termos de implementação prática e controle de parâmetros de texturização, além de ser relativamente barata (SZURDAK et al., 2014). Ferramentas de gravação mais duras permitem a gravação sem a necessidade de aquecimento prévio (PETTERSSON, 2005)

Na Figura 6 é apresentada uma imagem feita por microscopia eletrônica de varredura de uma textura feita no aço DIN 100Cr6 produzida por microcunhagem (GACHOT et al., 2017).

Figura 6 – Microcunhagem de Aço DIN 100Cr6



Fonte: Adaptada de Gachot et al. (2017).

Muitas destas técnicas possuem limitações por causa da espessura do material depositado e resistência mecânica limitada. A texturização requer uma capacidade de carga substancial para sustentar as tensões de cisalhamento sobrepostas pelo movimento de deslizamento na superfície (GACHOT et al., 2017).

### 3.2.1 Laser e suas aplicações

Após a teoria da relatividade de Einstein, o mesmo publicou em 1917, uma pesquisa sobre o terceiro processo de integração da matéria, a emissão estimulada de radiação, e desta forma forneceu os princípios teóricos para um novo tipo de luz. Posteriormente, Gordon Gould chamou-o de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação), e o processo ficou conhecido pela sigla LASER. O laser surge quando os átomos de uma estrutura recebem energia externa, levando-os a um estado excitado. Para voltar ao estado fundamental, a estrutura libera energia na forma de fótons. Esse processo se repete e os fótons podem ser refletidos dentro de um tubo (ressonador), resultando numa cadeia de emissão fotônica, em uma amplificação da emissão inicial (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2016).

A radiação eletromagnética de um feixe de laser é absorvida dentro das primeiras camadas atômicas de materiais opacos, como metais. A energia aplicada pode ser colocada precisamente na superfície focalizada. As vantagens comuns de uma superfície processada a laser em comparação com processos alternativos são: perfil térmico controlado; penetração térmica controlada; limpeza química; menos pós-processamento; relativamente fácil de automatizar e o processamento remoto sem contato geralmente é possível (STEEN; MAZUMDER, 2010).

Na área industrial, o laser tem várias aplicações, como soldagem, usinagem, gravação, tratamento de superfície e outras (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2016).

O tratamento de superfície é um assunto de considerável interesse, pois permite obter componentes aprimorados com superfícies idealizadas. Portanto, deve-se escolher estrategicamente os locais ou superfícies onde será realizado o tratamento, pois é necessário levar em conta o custo da operação versus aplicação que se quer. A depender da aplicação desejada outras técnicas serão mais

recomendadas, por exemplo, onde grandes áreas precisam ser processadas. Entretanto, para áreas discretas, o laser tem poucos concorrentes e pode fornecer uma ampla variedade de tratamentos. Atualmente, o uso de lasers no tratamento de superfícies incluem: tratamento térmico para endurecimento ou recozimento; texturização para melhorar propriedades da superfície; marcação a laser; microusinagem e outros (STEEN; MAZUMDER, 2010).

Segundo Kawagesi et al. (2009) e Youqiang et al. (2013), a texturização de superfícies permite alterar propriedades ópticas, alterando a reflexão da luz e, conseqüentemente, a coloração de superfícies. Permite alterar propriedades tribológicas, diminuindo ou amentando o atrito. As ranhuras podem aprisionar debris ou servir de depósito de lubrificante. Isso tem como consequência alteração de propriedade mecânica, como capacidade de suportar carregamento mecânico.

Em usinagem a texturização tem sido aplicada em ferramenta de corte para melhorar a adesão de revestimentos, para armazenar lubrificante sólidos ou para promover modificação na interface cavaco-ferramenta. Em todos os casos a intenção é diminuir temperatura de corte, esforços de corte e aumento da vida da ferramenta (NEVES et al., 2006; DENG et al., 2013; XIE et al., 2013).

### **3.2.2 Laser de pulsos ultracurtos**

Os lasers de pulsos ultracurtos são pacotes de onda eletromagnética, possuindo energia na faixa de dezenas a centenas de microjoules, que podem gerar pulsos de luz com duração de femtossegundos ( $10^{-15}$  s) a picossegundos ( $10^{-12}$  s), proporcionando intensidades na faixa de  $10^{12}$  a  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> com diâmetro de feixe que pode variar a centenas de nanometro a dezenas de micrometro (DIELS, 2006; SAMAD et al., 2012; BERTOLETE et al., 2018).

Segundo He et al. (2015), o pico de intensidade de um feixe de laser de femtossegundos focalizado pode ser tão alto, de modo a produzir um campo de luz altamente localizado que é suficiente para ionizar praticamente qualquer átomo, conseqüentemente, torna-se possível usinar qualquer material.

Nos sólidos as partículas atômicas geralmente estão presas em uma posição relativamente bem definida na rede cristalina. Seu movimento é geralmente restrito a vibrações de rede com períodos possíveis da ordem de 1000 fs (DIELS, 2006). Para remover um átomo de um sólido por meio de um pulso de laser, deve-se fornecer

energia de tal forma que ela seja maior do que energia de ligação desse átomo. Assim, para fazer a ablação da mesma quantidade de material com um laser de pulso ultracurto, deve-se aplicar uma quantidade de energia na proporção inversa a duração do pulso. Assim, com uma densidade de potência entre  $10^{12}$  a  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> pode-se ionizar praticamente qualquer material logo no início dos primeiros pulsos. Também é importante citar que a interação deste tipo de laser com o material metálico ou cerâmico é similar (GAMALY et al., 2002).

Como vantagem dos lasers de pulsos ultracurtos sobre os demais, pode-se citar:

- *Zona termicamente afetada (ZTA) desprezível:* isso ocorre devido a breve duração do pulso, menor do que o período de vibração térmica da rede, a energia térmica transferida para o volume do material é minimizada, resultando em mínima ou desprezível zona afetada pelo calor e, conseqüentemente, preservando as propriedades do material adjacente à região adjacente; (WANG et al., 2010);
- *Interação altamente não linear com a matéria em ponto focal:* isso implica em uma ablação em escala nano a micrométrica, ou seja, precisa e permitindo a microfabricação 3D (SAMAD et al., 2012);
- *Usina-se qualquer material:* pode-se usinar qualquer material sem a necessidade de alterar o comprimento de onda do laser, ou seja, com o mesmo laser (LIANG et al., 2003);
- *Versatilidade:* é uma ferramenta muito versátil, precisa e com alta repetibilidade, principalmente, quando se considera estágios de deslocamento X, Y e Z precisos e controlados por CNC, além disso sistemas de laser de elevada potência permitem o aumento da velocidade de processamento, o que implica em maior eficiência (WANG et al., 2010; SAMAD et al., 2012; HE et al., 2015).

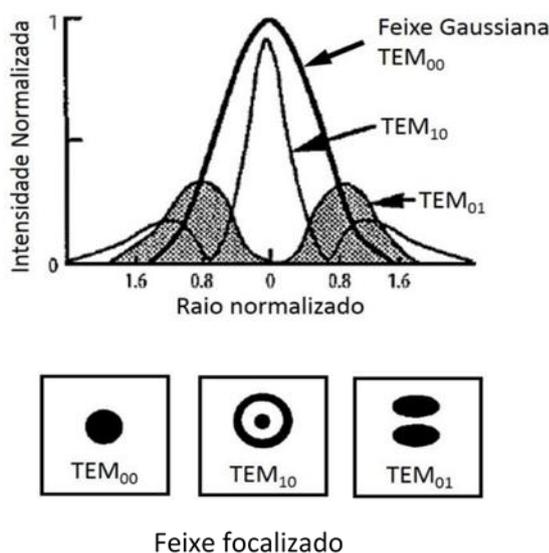
As desvantagens deste sistema de laser estão atribuídas a necessidade de um sistema de lentes para focalização do feixe compatível com as dimensões que se deseja obter, conseqüentemente, mais sofisticado. O alto grau de precisão requerido na operação depende de sistemas de posicionamento mais precisos, que por sua vez, acabam encarecendo o equipamento. Além do próprio sistema de laser e refrigeração (SAMAD et al., 2012; MIRIM et al., 2016; GACHOT et al., 2017).

### 3.2.3 Mecanismo de ablação

Quando um feixe de laser é focalizado sobre um material em processamento, a luz é absorvida provocando mudanças físicas na região de incidência (SAMAD et al., 2012). A absorção da energia do feixe de laser pela superfície implica em absorção de energia térmica, que aquece e transforma o volume de trabalho em um estado líquido, vaporizado e/ou quimicamente alterado (DUBEY; YADAVA, 2008).

As dimensões das estruturas resultantes deste processo dependem, em uma primeira aproximação, do diâmetro do feixe focalizado. Considerando um feixe de radiação eletromagnética monocromática, cujos perfis transversais de amplitude do campo elétrico e magnético são dados por uma função de Gauss com difração limitada para o modo transversal eletromagnético ( $TEM_{00}$ ), ver Figura 7, o diâmetro do mesmo se aproxima ao comprimento de onda do laser. No entanto, mesmo com a pequena dimensão do feixe sobre a superfície do material, a região de interação leva a difusão de calor para o volume, a depender do tipo de laser (SAMAD et al., 2012; STEEN; MAZUMDER, 2010).

Figura 7 – Feixe de laser com característica Gaussiana, ênfase no modo  $TEM_{00}$



Fonte: Adaptado de Steen e Mazumder (2010).

Segundo Mirim e de Rossi (2016) as dinâmicas de ablação podem ser divididas em: pulsos longos e curtos, e ultracurtos.

No regime de pulso longo, o processo de usinagem é consequência do aquecimento que resulta na fusão, evaporação ou sublimação do material,

dependendo da energia absorvida por unidade de tempo e volume, e de como ela flui para o interior do material. Quando a radiação do laser é absorvida, o material é aquecido e processos termodinâmicos são responsáveis pela difusão do calor e pela transformação de fases. No entanto, à medida que a duração do pulso diminui, elevadas intensidades de potência são alcançadas mais rapidamente, de modo que a propagação espacial de calor é reduzida e as transformações de fase que levam à remoção de material ocorrem com mais eficiência. Neste regime, o limiar de ablação diminui com a raiz quadrada da duração do pulso, demonstrando que a ablação é um processo térmico. O excesso de calor que não é usado para remover o material flui para a região adjacente à ablacionada, aumentando a sua temperatura e, eventualmente, criando uma ZTA, que modifica as propriedades do material (SAMAD et al., 2012).

O mecanismo de ablação para lasers de pulsos ultracurtos é quase o mesmo para todas as classes de materiais, basicamente existe dois mecanismos principais de ionização no campo do laser: ionização por impacto de elétrons (ionização por avalanche) e a ionização multifotônica (GAMALY, 2002).

A irradiação com pulsos ultracurtos de determinado material causa um desequilíbrio entre as temperaturas dos elétrons e da rede, quando o material é um metal, a radiação do laser será absorvida superficialmente por elétrons livres.

Quando o material é um dielétrico, a excitação e a ejeção dos elétrons fazem ocorrer a ionização da superfície por meio do efeito Coulomb de repulsão. Considerando que a densidade de elétrons livres é pequena, a alta intensidade do feixe focalizado é suficiente para induzir uma absorção multifotônica pelos elétrons ligados. Gerando nuvem de elétrons acima da região de foco e um desbalanço de carga abaixo dela. Isto causa uma forte repulsão entre os íons da rede e uma atração pela nuvem eletrônica, promovendo a remoção de material na região do foco do laser (NATHAN; MITRA; GUENTHER, 1985; SHANG et al., 2010).

Quando o pulso incide na superfície do material, os elétrons sementes são acelerados pelo campo elétrico gerado pelo pulso, além disso geram elétrons livres na banda de condução por colisões em um processo de avalanche exponencial, ou são ejetados da superfície por causa da energia cinética adquirida. Como dito anteriormente o processo de ejeção tem alta probabilidade de ocorrência na superfície a 100 nm, quando os elétrons adquirem alguns eV de energia cinética, podendo levar a um desequilíbrio de carga, que pode produzir uma explosão de Coulomb dos íons

da rede. Simultaneamente à ejeção dos elétrons da superfície, o processo de avalanche ocorre em uma camada mais profunda do material, aumentando a densidade e a temperatura dos elétrons livres, enquanto a rede é mantida em baixas temperaturas. Se a energia e a intensidade do pulso forem altas o suficiente, a densidade dos elétrons livres atinge um valor crítico (em torno de  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ), então eles transferem a sua energia para os íons adjacentes. Esse relaxamento aquece rapidamente a rede da vizinhança acima da sua temperatura de vaporização, criando uma fase instável que sofre uma violenta expansão adiabática (explosão de fase), que remove material da superfície, levando consigo a maior parte da energia térmica. Além disso, fragmentos de material podem ser ejetados, embora este não seja um efeito dominante. Devido a brevidade do pulso de laser ultracurto, a energia que não é retirada e flui para a rede, aquecendo-a, é minimizada ou até desprezada. O mecanismo dominante dependerá das características do pulso (energia, duração) e do material (NOLTE et al., 1997; SAMAD et al., 2012; GAMALY, 2002).

Dependendo do pulso de energia, dois modos de ablação podem ser identificados, a baixa e alta fluência. Em não-metals o mecanismo de ablação predominante em baixa fluência é explosão de Coulomb. Enquanto, a explosão de fase prevalece em regimes de alta fluência. Em metais ocorre explosão de fase (SAMAD et al., 2012).

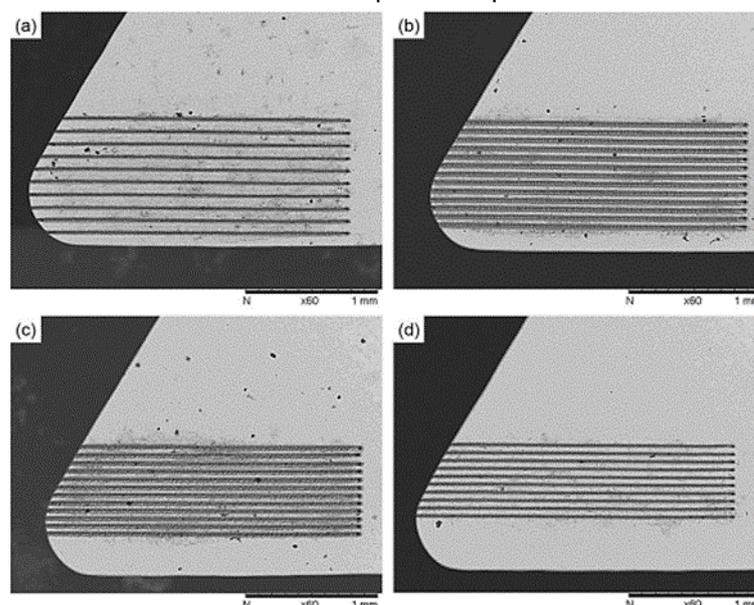
### **3.2.4 Trabalhos relacionados**

Bertolete et al. (2018) texturizaram a superfície de saída de ferramentas de carboneto de tungstênio não revestidas com laser de pulsos ultracurtos. Quatro modelos de texturas foram propostos com ranhuras paralelas distando de 100, 200, 300 e 400  $\mu\text{m}$  da aresta principal de corte da ferramenta, e com passo entre ranhuras de 95, 65, 60 e 60  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Na Figura 8 tem-se imagens em MEV das ferramentas. As pastilhas foram avaliadas no torneamento de um aço inoxidável martensítico (274 HV30). Ao comparar ferramentas não texturizadas (referência) com texturizadas, os autores observaram redução de 40% na força de atrito para o modelo de ferramenta texturizada a 300  $\mu\text{m}$  da aresta de corte. A mesma ferramenta apresentou melhor desempenho quanto a força de usinagem, redução de 21%. Também observaram menor grau de recalque para os cavacos formados a partir de

ferramentas texturizadas. Além de melhor acabamento para a superfície usinada da peça.

Sugihara e Enomoto (2009) também produziram texturas na escala nano/micrométrica em ferramentas de corte de metal duro revestidas com DLC e aplicaram-nas no fresamento de alumínio em condições lubrificadas. Eles observaram maior ângulo de cisalhamento para ferramentas nano/microtexturizadas do que para ferramentas não texturizadas, o que significa cavacos menos deformados. Além disso, notaram menor coeficiente de atrito com ferramentas texturizadas.

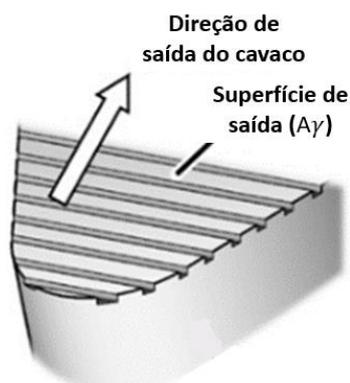
Figura 8 – Arestas de corte texturizadas: (a) Distância de 100  $\mu\text{m}$  da aresta principal de corte com passo 95  $\mu\text{m}$ ; (b) Distância de 200  $\mu\text{m}$  da aresta principal de corte com passo 65  $\mu\text{m}$ ; (c) Distância de 300  $\mu\text{m}$  da aresta principal de corte com passo 60  $\mu\text{m}$ ; (d) Distância de 400  $\mu\text{m}$  da aresta principal de corte com passo 60  $\mu\text{m}$



Fonte: Adaptado de Bertolete et al. (2018).

Kawasegi et al. (2009) também observaram maior variação no ângulo de cisalhamento no tornemaneto de alumínio utilizando mínima quantidade de fluido de corte. As nanotexturas feitas nas pastilhas de metal duro utilizando a técnica de ablação com laser da ordem de femtossegundos, diminuiu a força de corte devido à redução correspondente no atrito na superfície de saída da ferramenta. Este efeito depende fortemente da direção da textura. Forças de corte menores foram obtidas, quando a textura era perpendicular à direção do fluxo de cavacos em vez de paralela, ver Figura 9, isto só foi observado em altas velocidades de corte, acima de 420 m/min. Esses resultados indicam que as ferramentas desenvolvidas melhoraram efetivamente a usinabilidade da liga.

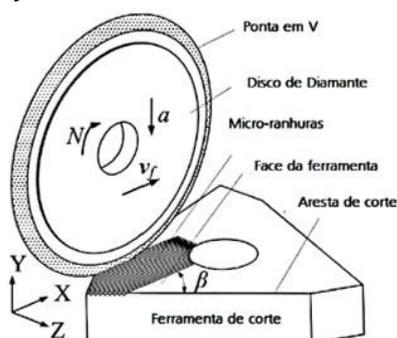
Figura 9 – Textura perpendicular à direção de saída do cavaco



Fonte: Adaptado de Kawasegi et al. (2009).

Xie et al. (2013) texturizaram ferramentas de metal duro utilizando um disco diamantado, ver Figura 10. Eles variaram a profundidade e largura das ranhuras em uma escala micrométrica. Testes foram realizados no torneamento de uma liga de titânio (Ti-6Al-4V) em operação de acabamento e de desbaste, ambos com corte a seco. Eles encontraram uma grande redução na força de corte, uma redução considerável na temperatura de corte e menos deformação de cavacos para as ferramentas texturizadas em comparação com as não texturizadas.

Figura 10 – Fabricação de micro ranhuras na superfície de saída do inserto de metal duro através de micro retificação com um disco de diamante com perfil V

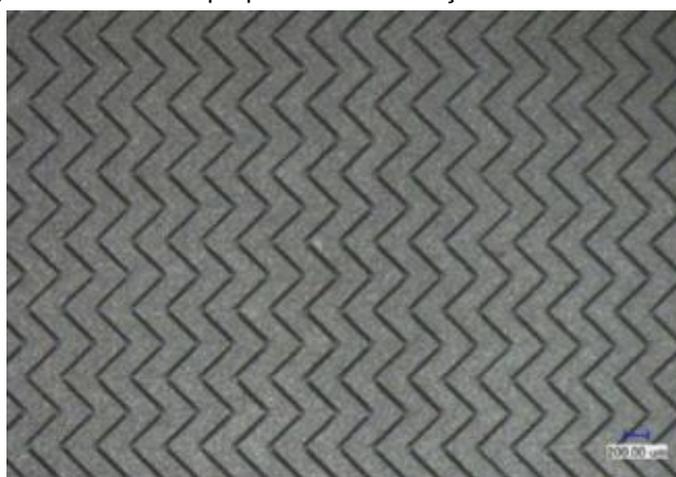


Fonte: Adaptado de Xie et al. (2013).

Acredita-se que uma menor área de contato que pode ser formada sobre as áreas texturizadas em uma ferramenta de corte. Assim, o material do cavaco a adere às ranhuras, por exemplo, da superfície de saída, devido às altas tensões de compressão, formando um tribofilme ou uma zona de fluxo, podendo ainda promover uma orientação da estrutura cristalina de forma a reduzir a força de atrito (BERTOLETE et al., 2018; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Youqiang et al. (2013) texturizaram a superfície da cerâmica  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$  com um laser Nd:YAG de nanossegundos. Diferentes características geométricas de texturas micro-ranhuradas regularmente organizadas foram fabricadas. As propriedades tribológicas das amostras texturizadas e lisas foram investigadas através da realização de testes de desgaste por deslizamento contra esferas de aço sob condição seca usando um tribômetro de esfera contra disco. O efeito da texturização da superfície na distribuição de tensões foi estudado pelo método dos elementos finitos (FEM). Os resultados mostraram que as superfícies texturizadas exibiram menor coeficiente de atrito e excelentes propriedades antidesgaste em comparação com superfícies lisas. As características tribológicas dependiam muito do tamanho e da densidade das micro-ranhuras, e as características geométricas das texturas têm um efeito significativo no comportamento tribológico. Dentre os padrões investigados, as amostras com sulcos ondulados (Figura 11) exibiram o menor coeficiente de atrito e taxa de desgaste. Uma grande densidade de textura pode ser a melhor para reduzir o atrito e o desgaste de amostras texturizadas. Enquanto, a taxa de desgaste das esferas deslizando contra superfícies texturizadas é maior do que a das esferas deslizando contra superfícies lisas. Os resultados mostram que a texturização da superfície pode melhorar a distribuição de tensão de interfaces de contato e reduzir a concentração de tensão.

Figura 11 – Textura perpendicular à direção de saída do cavaco



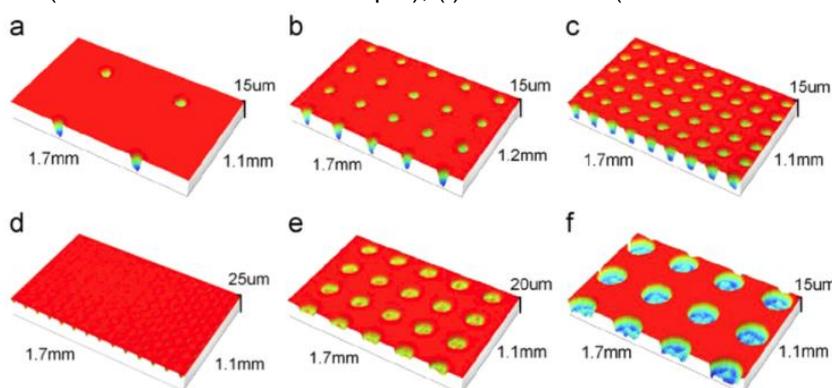
Fonte: Adaptado de Youqiang et al. (2013).

Joshi et al. (2016) texturizaram três tipos de Sialon,  $\alpha$ ,  $\beta$  e a fase composta  $\alpha/\beta$ . Todas as texturas foram feitas com laser de nanossegundos de Nd:YAG diferentes passos. Ensaio tribológico foi realizado a seco sob uma carga de 10 N em temperatura

ambiente. A fase composta  $\alpha/\beta$ -Sialon apresentou o menor coeficiente de atrito, ou seja, 0,04 e 0,1 para as amostras texturizadas e sem textura, respectivamente. As cerâmicas Sialon apresentam desgaste moderado e, portanto, a taxa de desgaste da esfera de aço (parceiro de acoplamento) foi levada em consideração para a análise de desgaste. A fase  $\alpha$ -Sialon com maior dureza apresentou menor desgaste em comparação com a fase composta  $\alpha/\beta$ -Sialon e a fase  $\beta$ -Sialon.

Shum, Zhou e Li, (2013) texturizaram a laser calotas em superfícies de aço M2 usando o laser Nd:YAG para estudar a resistência ao desgaste de revestimentos de carbono (DLC). Nos experimentos, a densidades das texturas variou de 0 a 30%, e os diâmetros de ondulações variaram de 40 a 300  $\mu\text{m}$ , ver Figura 12. O efeito dos parâmetros geométricos no desempenho de desgaste foi estudado usando um contra corpo esférico de WC-6Co em ensaio de desgaste deslizante alternativo sob condições de lubrificação com óleo. Os resultados mostraram que os revestimentos DLC depositados em substrato com densidade de 10% e diâmetro de 100  $\mu\text{m}$  apresentaram menor coeficiente de atrito e taxa de desgaste em comparação com os revestimentos DLC não texturizados. O tratamento experimental produziu reduções respectivas de 20% no atrito e quase 52% na taxa de desgaste. Essa melhoria pode ser explicada pela ação de reservatórios que aumentam a retenção do lubrificante e prendem as partículas de desgaste durante os movimentos de deslizamento.

Figura 12 – (a) amostra A1 (densidade da textura de 2%); (b) amostra A3 (densidade da textura de 10%); (c) amostra A5 (densidade da textura de 30%); (d) amostra B1 (diâmetro da calota de 40  $\mu\text{m}$ ); (e) amostra B5 (diâmetro da calota de 200  $\mu\text{m}$ ); (f) amostra B6 (diâmetro da calota de 300  $\mu\text{m}$ )



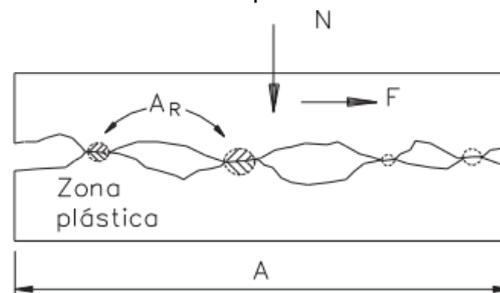
Fonte: Adaptado de Shum, Zho e Li (2013).

### 3.3 USINAGEM: INTERFACE CAVACO-FERRAMENTA

Na interface cavaco-ferramenta as leis de atrito de Coulomb e Amonton ( $F = \mu \cdot N$ ), não são apropriadas para descrever todas as condições de atrito que ocorre no corte dos metais, pois na região de interface cavaco-ferramenta, as pressões normais exercidas sob a superfície de saída da ferramenta são muito altas, portanto justifica-se o interesse sobre tal assunto, uma vez que entendendo os mecanismos de atrito que ocorrem nesta interface, será possível compreender melhor como ocorre os mecanismos de desgaste e como fazer para evitar o desgaste prematuro de ferramentas de corte (TRENT; WRIGTH, 2000).

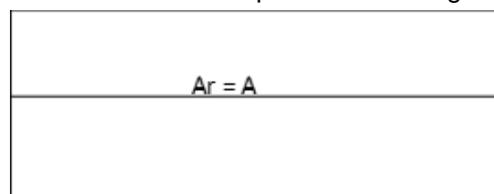
Devido a alta carga normal aplicada na interface cavaco-ferramenta, os pontos de contato das irregularidades da superfície, que em condições normais são os responsáveis pelo atrito descrito pela lei de Coulomb e Amonton, sofrerão uma deformação plástica intensa, portando, as áreas de contato real ( $A_r$ ), que em condições normais, são muito menores que a área de contato aparente ( $A$ ) (Figura 13), agora se tornarão aproximadamente iguais (Figura 14). Nestas condições, não será mais possível utilizar as leis de atrito convencionais, isto é, a força tangencial não é mais proporcional à força normal. Ela passa a ser uma constante que possui o valor necessário para vencer a resistência ao cisalhamento do material menos resistente (MACHADO et al., 2015).

Figura 13 – Área de contato numa superfície levemente carregada ( $A_r \ll A$ )



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015).

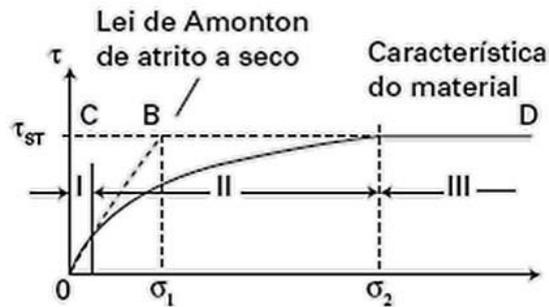
Figura 14 – Área de contato numa superfície com cargas elevadas ( $A_r = A$ )



Fonte: Produção do próprio autor.

Shaw (2005) divide o atrito na usinagem dos metais em três regimes distintos. O regime I é regido pela lei de atrito de Coulomb, o Regime II é um regime de transição entre o I e o III e o regime III é aquele em que não existe superfície livre entre os materiais, ou seja,  $A_r = A$ , ver Figura 15.

Figura 15 – Três tipos de regime de atrito sólido

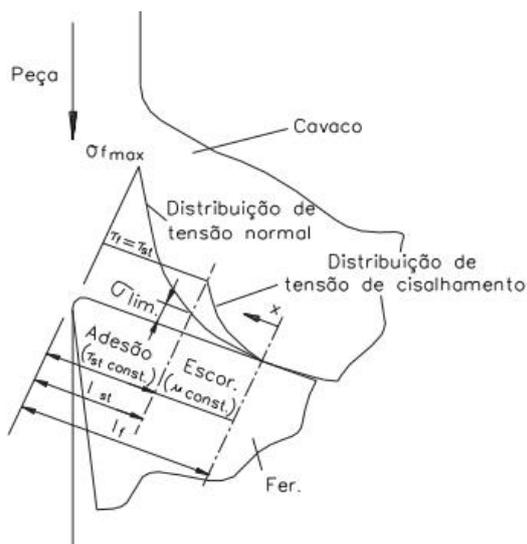


Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015).

De acordo com Machado et al. (2015), Zorev apresentou um modelo de distribuição de tensão na superfície de saída da ferramenta de usinagem. Na Figura 16 o comprimento de contato é dividido em duas regiões: a região de aderência, mais próxima da ponta da ferramenta, e a região de escorregamento. Segundo este modelo a tensão sobre a ferramenta será máxima na ponta da ferramenta, e permanecerá constante durante toda a zona de aderência, esta mesma tensão decresce exponencialmente em função da distância percorrida ao longo da superfície de saída da ferramenta, até chegar a zero, neste ponto não há mais contato entre cavaco e ferramenta. A zona de aderência e a zona de escorregamento são delimitadas pela Tensão normal limite ( $\sigma_{lim}$ ).

Segundo Trent e Wright (2000) as condições de aderência são inevitáveis, pois para a grande maioria dos materiais, irão ocorrer na interface cavaco-ferramenta altas temperaturas. Estas altas temperaturas são causadas por altas tensões de compressão, que ocasionam altíssimas taxas de deformações plásticas, além disso, a pureza do material de corte em contato com a ferramenta, promovem ligações atômicas nesta interface, ocasionando a zona de aderência.

Figura 16 – O modelo de distribuição de tensão na superfície de saída da ferramenta proposto por Zorev



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015).

Bahi et al. (2012) mencionam que o tamanho da zona de aderência e escorregamento depende das tensões, velocidade de corte e da temperatura. Com velocidades de corte baixas, o fenômeno tribológico de deslizamento será predominante na interface cavaco-ferramenta. Conforme a velocidade de corte é aumentada, há uma transição no fenômeno tribológico de deslizamento para aderência. O contato atômico é estabelecido na interface cavaco-ferramenta, devido ao efeito da alta pressão de compressão e à queda na tensão de escoamento do material do cavaco, resultado do aumento da temperatura. A camada do cavaco em contato com a ferramenta é estacionária e o movimento relativo ocorre em camadas adjacentes com a velocidade de cisalhamento aumentando gradualmente até que a velocidade de saída do cavaco seja alcançada. Devido à complexidade do contato cavaco-ferramenta, o entendimento completo das condições de contato não foi desenvolvido o suficiente.

### 3.3.1 Esforços de corte

Saber mensurar os esforços de corte que atuam sobre a ferramenta de corte durante o processo de usinagem, é de extrema importância para o estudo científico que corrobora com o desenvolvimento de novas ferramentas de corte, acessórios de

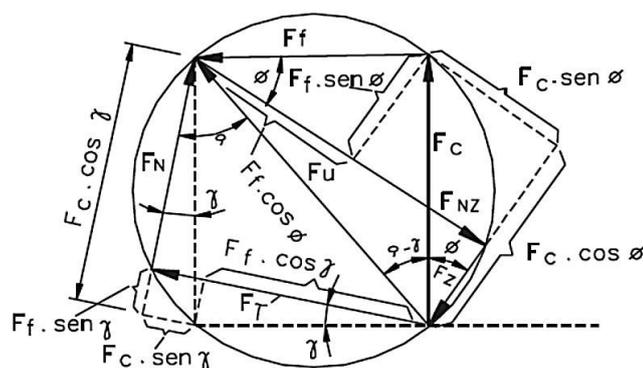
usinagem, máquinas ferramentas e estratégias de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Sabe-se que as propriedades dos materiais têm grande influência nos esforços de corte, além disso, a geometria da ferramenta, o fluido de corte utilizado e a rigidez da máquina-ferramenta também influenciam fortemente nas forças envolvidas durante a usinagem (MACHADO et al., 2015).

A análise das forças de corte tende a ser mais complexas quando se considera o corte oblíquo ou tridimensional. Para facilitar o estudo científico considera-se o corte ortogonal. Nesta situação, a aresta cortante é uma reta normal à direção de avanço e à direção de corte, desta forma é possível considerar que a formação do cavaco ocorre no plano bidimensional (MACHADO; da SILVA, 2015).

Considerando o corte ortogonal, Merchant (1945) propôs uma análise geométrica das componentes de força que atuam cunha cortante. Através de um círculo, cujo o diâmetro corresponde força de usinagem ( $F_u$ ) todas as outras componentes atuantes podem ser decompostas, conhecendo o ângulo de saída ( $\gamma$ ), o ângulo de cisalhamento ( $\phi$ ) e duas componentes ortogonais, força de corte ( $F_c$ ) e da força de avanço ( $F_f$ ), ver Figura 17.

Figura 17 – Círculo de Merchant



Fonte: Merchant (1945).

Através da Figura 17, nota-se que ( $F_u$ ) é a resultante das forças ortogonais ( $F_c$ ) e ( $F_f$ ). Além disso, através de relações geométricas podem ser determinadas a força tangencial ( $F_t$ ), a força normal ( $F_N$ ), ambas atuando sobre a superfície de saída da ferramenta, assim como a força de cisalhamento ( $F_z$ ) atuando no plano de cisalhamento primário e força normal ao plano de cisalhamento primário ( $F_{Nz}$ ), conforme as equações (1) a (4).

$$F_T = F_C \cdot \text{sen}\gamma + F_f \cdot \text{cos}\gamma \quad (1)$$

$$F_N = F_C \cdot \text{cos}\gamma - F_f \cdot \text{sen}\gamma \quad (2)$$

$$F_Z = F_C \cdot \text{cos}\phi - F_f \cdot \text{sen}\phi \quad (3)$$

$$F_{NZ} = F_C \cdot \text{sen}\phi + F_f \cdot \text{cos}\phi \quad (4)$$

Sistemas dinamométricos medem as componentes ortogonais atuantes na cunha da ferramenta de corte, logo a resultante delas é a  $F_u$ .

A geometria da ferramenta, bem como o material com que ela é feita influência diretamente nos esforços de corte, portanto, qualquer alteração causada na interface cavaco-ferramenta, pode facilitar ou dificultar o movimento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta.

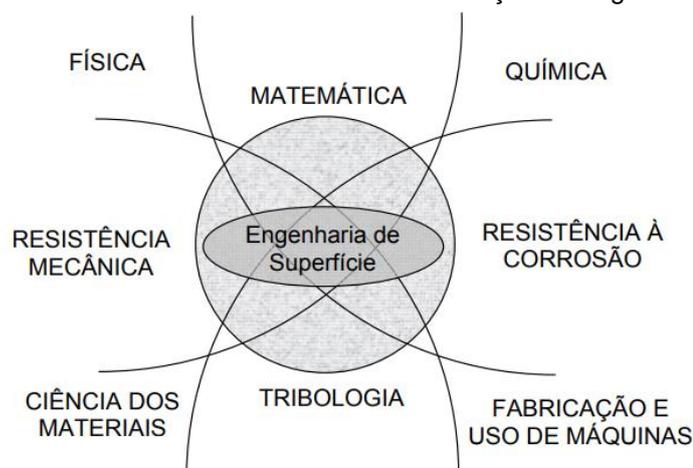
### 3.3.2 Desgaste

Segundo Hutchings e Shipway (2017) o desgaste pode ser definido como dano causado a uma superfície sólida, envolvendo perda progressiva de material, devido ao movimento relativo entre os corpos.

Por maior que seja a resistência ao desgaste e dureza de um determinado material, sempre que houver contato e movimento relativo contra outro corpo, haverá desgaste (MACHADO et al., 2015).

Para estudar e solucionar como ocorre e como mitigar os danos causados pelo desgaste, é de fundamental importância compreender o que é engenharia de superfície. Segundo Burakouzki e Wierzchon (1999), é o estudo que envolve todos os problemas técnicos e científicos relacionados com a modificação das superfícies ou a fabricação de camadas superficiais. Para a criação de uma superfície ideal necessita-se de um esforço conjunto que envolve diversas áreas do conhecimento, ver Figura 18.

Figura 18 – Atividade científica e técnica envolvida na criação da engenharia da superfície



Fonte: Burakouzki e Wierzchon (1999).

A usinagem é uma das áreas científicas que utilizam do conhecimento de engenharia de superfície para melhor compreensão dos mecanismos de desgaste que ocorrem em ferramentas de corte (TRENT; WRIGTH, 2000).

Estudar e compreender o mecanismo pelo qual ocorre o desgaste em insertos de corte é de extrema importância, pois possibilita a tomada de decisão antes que a ferramenta venha a falhar durante o processo de usinagem, desta forma, evitando prejuízos como paradas de máquina, quebra do suporte de ferramenta, erro dimensional no produto acabado e etc. Além disso, o conhecimento do processo de desgaste possibilita o desenvolvimento de novas ferramentas de corte, tornando-as mais resistentes aos fenômenos negativos envolvidos durante o processo de usinagem (MACHADO et al., 2015).

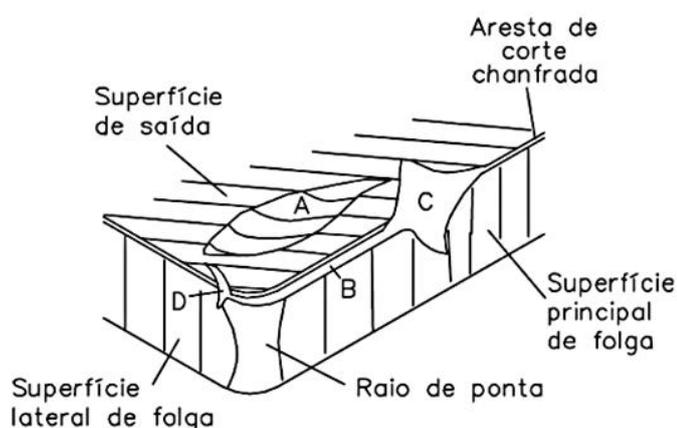
A norma ABNT NBR ISO 3685:2017 citam três fenômenos pelos quais uma ferramenta de corte perde sua eficácia na usinagem, são eles: desgaste, avaria e deformação plástica. Nos fenômenos de desgaste e avaria ocorrem perda de material da ferramenta, enquanto o fenômeno de deformação plástica promove apenas deslocamento de material do inserto. Para melhor entendimento destes fenômenos se faz necessário uma breve explicação de suas respectivas definições:

- Desgaste: a Norma ABNT NBR ISO 3685:2017 também define desgaste na ferramenta, como a mudança de seu formato original durante o processo de corte, ocorrendo perda progressiva de material. O desgaste pode ocorrer devido a vários mecanismos, sendo que a temperatura alcançada durante o corte tem grande influência;

- **Avaria:** Ocorre de forma inesperada, podendo causar a inutilização total do inserto, pode ocorrer por trincas e lascamento na aresta de corte. Normalmente o que define se ocorrerá uma quebra total ou parcial é a tenacidade do material da ferramenta. É muito improvável que uma avaria ocorra durante o corte contínuo (torneamento), sendo mais provável a ocorrência deste fenômeno em cortes interrompidos, como no fresamento, devido à choques térmicos e mecânicos (TRENT; WRIGTH, 2000; MACHADO et al., 2015);
- **Deformação plástica:** É o deslocamento de material na geometria da ferramenta de corte pelo esforço de compressão e cisalhamento, sendo este fenômeno mais comum em ferramentas tenazes como o aço rápido (MACHADO; da SILVA, 2015; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Diniz, Marcondes e Coppini (2014) e norma ABNT NBR ISO 3685:2017 citam que existe vários tipos de desgaste que acontecem em uma ferramenta de corte, dentre eles os mais importantes são: Desgaste de cratera, desgaste de flanco (ou frontal) e desgaste de entalhe, ver Figura 19.

Figura 19 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte



Fonte: Dearnley e Trent (1982) apud Machado et al. (2015).

Amorim (2002) descreve os tipos de desgaste da seguinte forma:

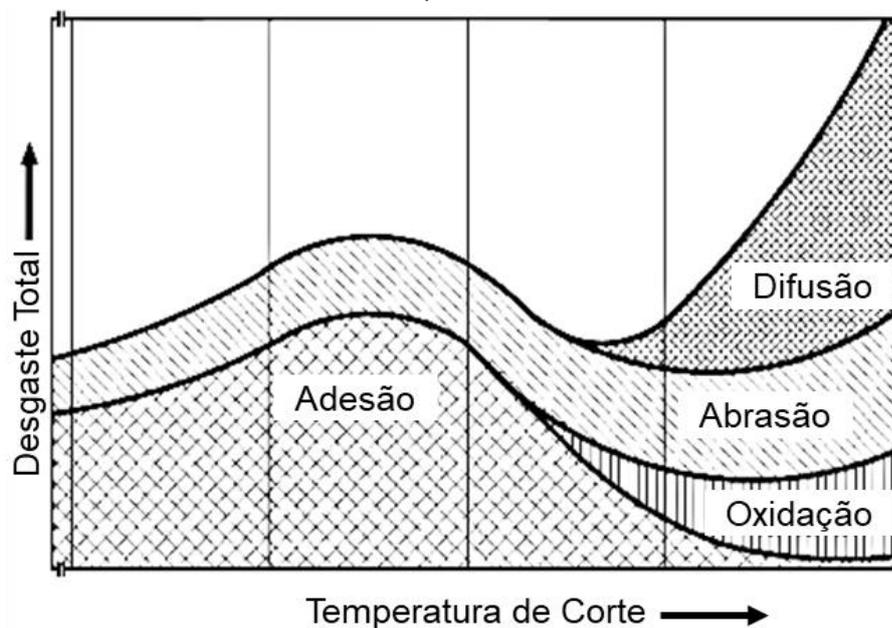
- **Desgaste de cratera:** ocorre na superfície de saída da ferramenta, local onde acontece o deslizamento do cavaco. Está localizado na região A da Figura 19;
- **Desgaste de flanco:** ocorre nas superfícies de folga, atingindo a aresta principal de corte primária e secundária. Quando atinge a aresta principal de corte, resulta em aumento das forças e temperaturas envolvidas durante o corte,

podendo causar vibrações na ferramenta e conseqüentemente na peça. Enquanto na aresta secundária de corte, um desgaste excessivo resulta numa superfície com acabamento ruim e peças fora da especificação. Este tipo de desgaste é muito utilizado para determinar o fim de vida da ferramenta, já que este é o desgaste que apresenta maior risco de danos à peça. Está localizado na região B conforme Figura 19;

- *Desgaste de entalhe*: aparece sempre nas regiões coincidentes com as laterais do cavaco. É comum o desgaste de flanco ser mais expressivo no local onde acontece o contato com a superfície externa da peça. A provável causa para o desenvolvimento do desgaste de entalhe é: formação de trincas térmicas devido a um alto gradiente de temperatura.

Em condições de corte normais, todas as formas de desgaste citadas (cratera, entalhe e flanco) podem estar atuando no momento da usinagem, porém uma delas prevalecerá de acordo com as condições de corte presente. Estas formas de desgaste acontecem devido a diversos mecanismos de desgaste. Geralmente os tipos de mecanismos são apresentados em um diagrama Desgaste total x Temperatura de corte, ver Figura 20, em que o desgaste total é apresentado na ordenada e a temperatura de corte na abscissa (MACHADO et al., 2015).

Figura 20 – Diagrama de mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura



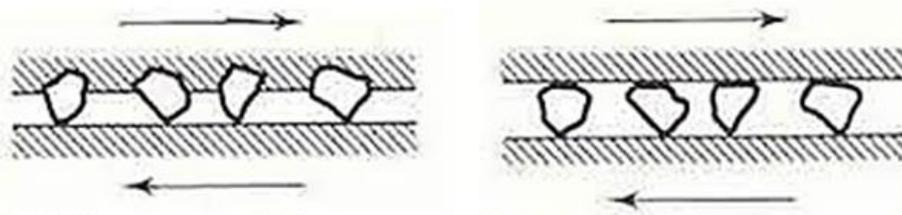
Fonte: Vierege (1970) apud Machado et al. (2015).

Observa-se no diagrama mostrado na Figura 20, que quanto maior for a temperatura de corte os mecanismos de desgaste como difusão, abrasão e oxidação estarão presentes, tendo a difusão posição de destaque dentre as demais com crescimento ocorrendo de forma exponencial. Em menores temperaturas os mecanismos de adesão e abrasão prevalecem, sendo o mecanismo de adesão o mais relevante (MACHADO et al., 2015).

Segundo Pigari (1995), o mecanismo de adesão acontece quando na interface cavaco-ferramenta, ocorre um fenômeno similar à soldagem entre as duas partes. As partículas formadas neste local são arrancadas e levadas de maneira periódica com a peça ou o cavaco.

Hutchings e Shipway (2017) dividem o desgaste abrasivo em dois tipos, desgaste abrasivo a dois corpos e desgaste abrasivo a três corpos. O desgaste abrasivo a dois corpos ocorre quando dois materiais entram em contato entre si. O material abrasivo encontra-se engastado em um dos corpos em movimento relativo. Enquanto que no desgaste abrasivo a três corpos, tem-se um terceiro corpo (abrasivo) capaz de rolar e/ou deslizar entre as superfícies em movimento relativo, ver Figura 21.

Figura 21 – Desgaste abrasivo. (a) Dois corpos; (b) Três corpos



Fonte: Adaptado de Hutchings (1995).

Segundo Machado et al. (2015), na usinagem esses dois tipos de desgaste abrasivo podem acontecer. O desgaste a dois corpos acontece quando precipitados duros (nitretos, carbonitretos, óxidos ou carbonetos) da própria peça de trabalho agem como partículas abrasivas que provocam o desgaste do inserto. Na abrasão a três corpos ocorre quando as partículas abrasivas se depreendem da ferramenta e introduzidas no fluxo de material.

Diniz, Marcondes e Coppini (2014) citam que a difusão é um fenômeno microscópico, sendo ativada pela temperatura da zona de corte. Esse mecanismo envolve transferência de massa em nível atômico, depende da temperatura, do tempo

de contato ferramenta-peça e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo. A difusão ocorre na superfície de saída da ferramenta assim como na superfície de folga, a taxa de desgaste aumenta em função da velocidade de corte e de avanço, uma vez que o incremento desses dois parâmetros aumenta consecutivamente a temperatura.

Pigari (1995) afirma que a oxidação do inserto ocorre devido ao aquecimento da aresta de corte, provocando a formação de uma camada de óxido na superfície de saída e próximo à aresta lateral de corte. Segundo Ferraresi (1970), a oxidação provoca o desgaste da aresta lateral de corte, o que prejudica o acabamento superficial dos produtos acabados, causando o fim da vida da ferramenta.

### 3.4 ENSAIO TRIBOLÓGICO DE MICROABRASÃO

A resistência ao desgaste abrasivo de determinado material pode ser avaliada por alguns tipos de testes de laboratório e os resultados não dependem somente das propriedades intrínsecas do material, mas sim, do método de ensaio empregado. Um dos métodos empregados para adquirir resultado é o desgaste abrasivo em microescala, mais conhecido como ensaio de microabrasão (SHIPWAY; HODGE, 2000).

Segundo Gómez (2014) o ensaio de microabrasão é utilizado para estudar o desgaste abrasivo em escala micrométrica e pode ser um método muito útil para análises preliminares de resistência ao desgaste abrasivo em ferramentas de corte para usinagem. O ensaio pode contribuir para a compreensão de fenômenos envolvidos na interface cavaco ferramenta, e desta forma, auxiliar na interpretação dos resultados de usinagem, na região de interface cavaco-ferramenta que é de difícil acesso experimental.

Além de ser um ensaio importante para o estudo do desgaste abrasivo, ele apresenta a vantagem de ser relativamente barato e de rápida realização, requerendo somente pequenas áreas nas amostras. O teste produz crateras cujas medidas de profundidade são da ordem de micrômetros, particularmente adequados para avaliar a resistência ao desgaste de revestimento (GANT; GEE, 2011).

Trezona et al. (1999) descrevem que o método de ensaio de microabrasão consiste na rotação de uma esfera de raio (R) contra uma amostra fixa, produzindo

uma calota de desgaste com geometria circular, refletindo a geometria do contra-corpo esférico. Na interface de contato há uma lama constituída por pequenas partículas abrasivas. O volume desgastado pode então ser calculado pela medição do diâmetro da cratera formada ou pela medição de sua profundidade da calota impressa no material. Para materiais homogêneos e não revestidos, o volume desgastado ( $V$ ) pode ser calculado em função da distância total deslizada ( $L$ ) e da carga normal sobre o contato ( $W$ ), conforme a equação proposta por Rabinowicz, a qual é equivalente à equação de Archard para desgaste por deslizamento, ver equação (5).

$$V = KLW \quad (5)$$

Onde  $K$  é o coeficiente de desgaste dimensional, cuja unidade é  $[N^{-1}.m^2]$ . A resistência ao desgaste abrasivo é o inverso do coeficiente de desgaste e é dada por  $K^{-1}$  e tem unidade  $[N.m^{-2}]$ . A relação de  $K^{-1}$ , como parâmetro para verificar a resposta do material ao desgaste abrasivo, está restrita a situações no qual o volume desgastado é diretamente proporcional à distância deslizada e à carga normal (TREZONA et al., 1999).

Para uma impressão em uma amostra inicialmente plana de desgaste com formato esférico, a resistência ao desgaste microabrasivo ( $K^{-1}$ ) das superfícies pode ser calculado a partir das dimensões da calota ( $b$ ), do raio da esfera ( $R$ ), da distância deslizada ( $S$ ) e carga normal aplicada ( $N$ ) com as seguintes equações, ver equação (6) (RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1996; YAHYA; TODD, 2012).

$$K^{-1} = \frac{SN}{(\pi b^4/6R)} \quad (6)$$

Este ensaio de microabrasão, possui vários parâmetros nos quais variam de acordo com os parâmetros selecionados, como por exemplo: a carga aplicada, o tamanho e tipo de esfera, a velocidade de deslizamento, o tipo e tamanho da partícula abrasiva, a concentração e taxa de alimentação da lama abrasiva, entre outros (SHIPWAY; HODGE, 2000).

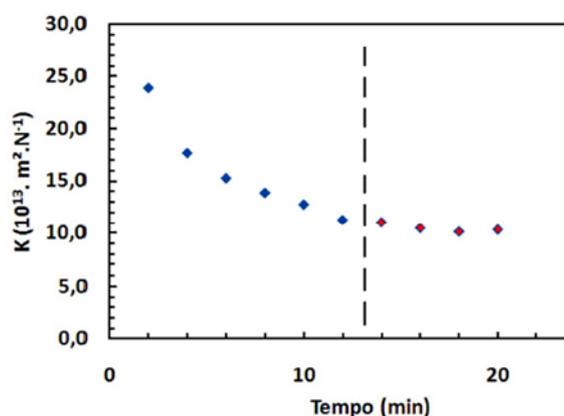
Trezona et al. (1999) realizaram o ensaio de microabrasão na configuração de esfera fixa, com o intuito de avaliar a influência da carga normal, composição do abrasivo e sua concentração no mecanismo de desgaste. Eles observaram três



apresenta ambas características: riscos na região central da cratera (dois corpos) e indentações na região de borda da cratera (três corpos) (TREZONA et al., 1999).

Um dos fatores para se obter uma coleta de dados confiáveis do comportamento de um tribossistema é a escolha correta do tempo necessário ou distância deslizada, a partir do qual se estabelece um regime permanente de desgaste, denominado de *running-in*, a partir deste valor pode-se afirmar que a taxa de desgaste atingiu o regime permanente, ver Figura 24 (MARQUES, 2018).

Figura 24 – Período de *running-in* do ensaio de microabrasão de um aço superduplex UNS S32750 recozido



Fonte: Marques (2018).

### 3.5 DESVIOS MICRO E MACROGEOMÉTRICOS

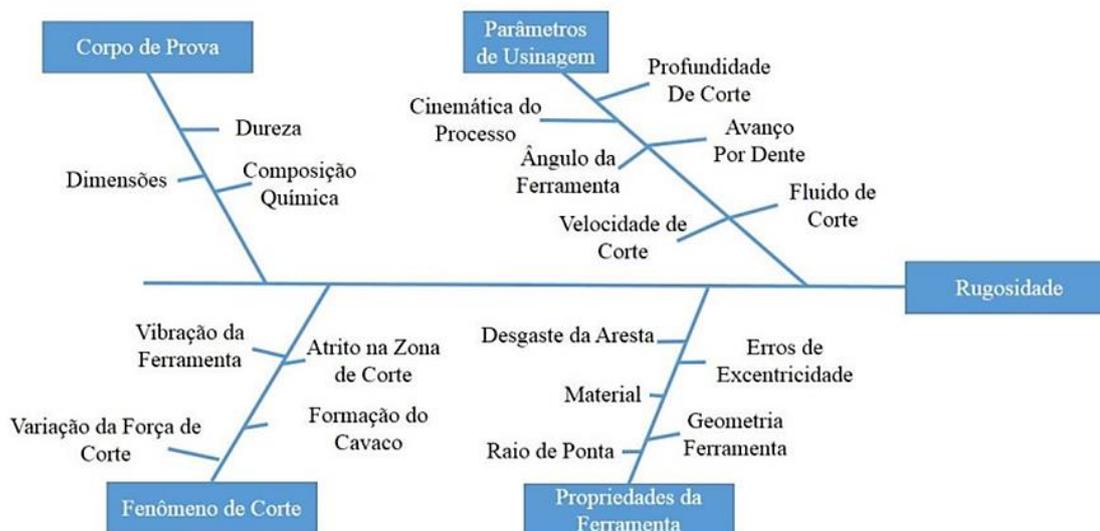
Neste item disserta-se sobre o desvio microgeométrico de rugosidade e macrogeométrico de circularidade.

#### 3.5.1 Rugosidade

Rugosidade são erros microgeométricos existentes nas superfícies das peças, provenientes do processo de fabricação, tais como ranhuras, sulcos, estrias, escamas e crateras. As ranhuras e sulcos são, na maioria das vezes, provenientes de marcas da ferramenta durante o avanço ou posicionamento da peça no processo de usinagem. As estrias e escamas formam-se na usinagem durante a retirada do cavaco (CATAPAN, 2013).

Bajić et al. (2012) mencionam que os parâmetros que influenciam a rugosidade da peça como, condições de corte, geometria do inserto, material a ser usinado devem ser levados em conta no momento da fabricação da peça para alcançar os objetivos pré-determinados no projeto. A Figura 25 mostra os parâmetros que influenciam a rugosidade no processo de corte.

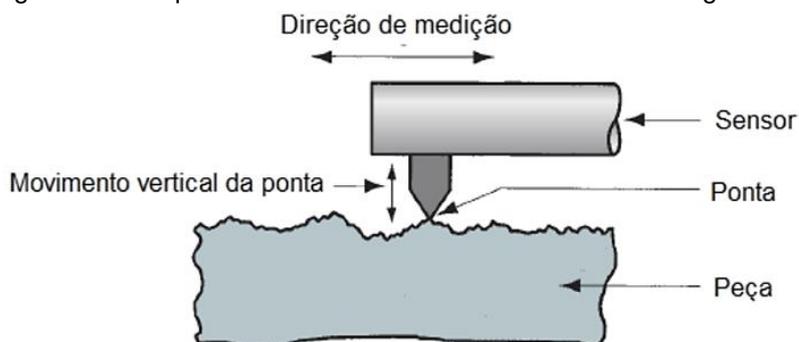
Figura 25 – Fatores que influenciam a rugosidade



Fonte: Bajić et al. (2012).

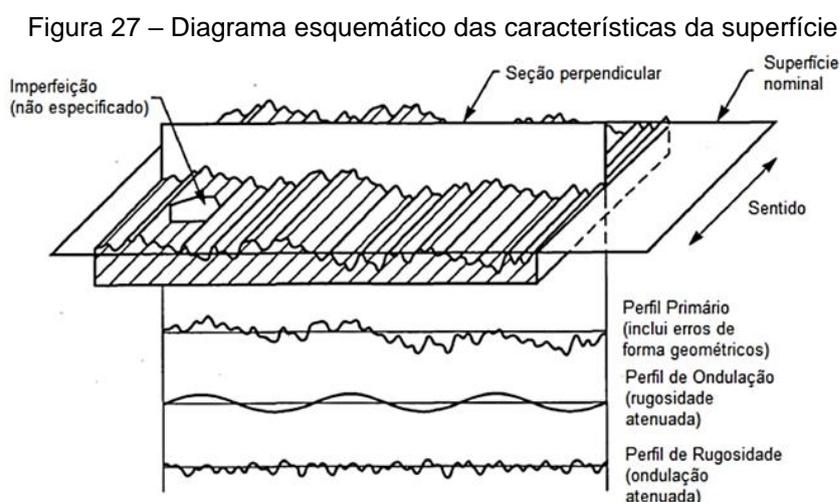
Na avaliação da rugosidade, utiliza-se o equipamento chamado rugosímetro. De forma bem simples, seu funcionamento consiste em uma ponta que atravessa horizontalmente a superfície, por onde, através de movimentos verticais, o perfil da superfície é lido e calculado através do parâmetro de rugosidade escolhido, ver Figura 26 (SANTANA, 2022).

Figura 26 – Esquema ilustrativo do funcionamento de um rugosímetro



Fonte: Groover (2010).

Segundo a norma ASME B46 (2002) o perfil de rugosidade é gerado através dos movimentos horizontais do apalpador sobre a peça a ser analisada, a partir deste contato, é gerado um perfil de duas dimensões (2D), chamado de perfil primário, este perfil é utilizado para o cálculo de parâmetros de rugosidade ou de ondulação, perfil R e W, respectivamente, a escolha dos perfis será feita em função do filtro escolhido. Na Figura 27 tem-se um diagrama esquemático das componentes de um perfil de rugosidade.



Fonte: ASME B46 (2002).

A norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) define o comprimento de amostragem, mais conhecido como *cutoff*, como o comprimento na direção X onde será avaliado as irregularidades delimitadas pelo perfil que está sob avaliação. Enquanto o comprimento de avaliação é descrito como o comprimento na direção X, que pode conter um ou mais comprimentos de amostragem (*cutoff*), que é utilizado para estabelecer o perfil avaliado. A norma recomenda um comprimento de avaliação equivalente a cinco vezes o comprimento de amostragem para obter o maior grau de confiabilidade, ver Tabela 1.

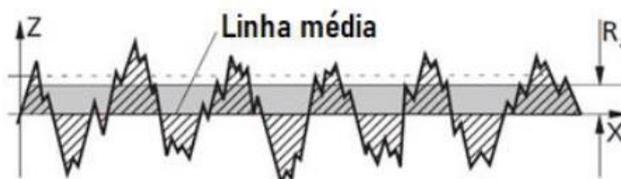
Tabela 1 – Valores recomendados para os comprimentos de amostragem e de avaliação

Perfis Periódicos	Perfis não periódicos		Comprimento de amostragem Lc (mm)	Comprimento de avaliação (mm)
Distância do espaçamento entre os sulcos RSm (mm)	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Faixa de Ra ( $\mu\text{m}$ )	Cutoff ( $\lambda\text{c}$ ) (mm)	$\lambda\text{c} / L$ (mm)
>0,013 a 0,04	0,1	até 0,02	0,08	0,08/0,4
>0,04 a 0,13	>0,1 a 0,5	de 0,02 a 0,1	0,25	0,25/1,25
>0,13 a 0,4	>0,5 a 10	de 0,1 a 0,2	0,8	0,8/4
>0,4 a 1,3	>10 a 50	de 2 a 10	2,5	2,5/12,5
>1,3 a 4	>50	de 10 a 80	8	8/40

Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 4288:2008.

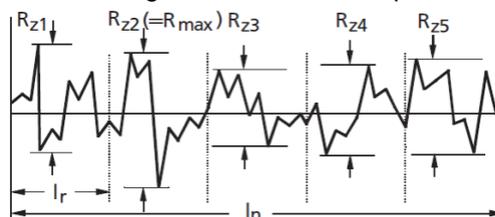
Entre diversos parâmetros de amplitude, os mais utilizados são o parâmetro Ra e Rz. O parâmetro Ra é utilizado como parâmetro de controle de processo, pois consegue medir um valor médio de rugosidade no comprimento de avaliação, uma vez que não sofre influência de desvios esporádicos, ver Figura 28. O parâmetro Rz é diferença de altura entre a média dos cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos ao longo do comprimento de avaliação, ver Figura 29 (MUMMERY, 1992).

Figura 28 – Diagrama de Cálculo do parâmetro Ra



Fonte: Adaptado de Mahr (2010).

Figura 29 – Diagrama do cálculo do parâmetro Rz



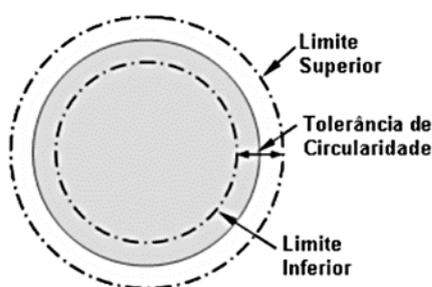
Fonte: Adaptado Mahr (2010).

### 3.5.2 Desvios macrogeométricos

Segundo a norma (ASME Y 14.5:2018) os desvios macrogeométricos são divididos em 4 categorias, são eles: desvios de orientação (paralelismo, perpendicularidade e inclinação), posição (posição, concentricidade, coaxialidade e simetria), forma (circularidade, cilíndricidade, retitude, planeza, perfil de linha ou de superfície qualquer) e batimento (circular e total).

Para efeitos práticos, este trabalho aborda somente o desvio de circularidade. Desvios de circularidade acontecem na seção circular de uma peça em forma cilíndrica ou cônica. Para se representar a circularidade necessita-se de dois círculos concêntricos que irão indicar os limites superiores e inferiores de tolerância de circularidade, ver Figura 30 (CATAPAN, 2013).

Figura 30 – Representação da tolerância de circularidade

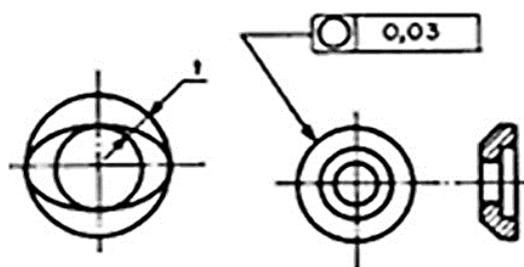


Fonte: Catapan (2013).

Para dizer se uma peça está dentro ou não do desvio de circularidade, deve-se atender a condição em que todos os pontos de uma de revolução em qualquer seção perpendicular a um eixo comum estejam dentro dos limites superiores e inferiores dos dois círculos, circunscrito e inscrito (NOVASKI, 2013).

Segundo a norma ABNT NBR 6409 (1997), o campo de tolerância é limitado na seção de medição por dois círculos concêntricos, afastados a uma distância "t". Na Figura 31 é exemplificado que a circunferência deve estar localizada entre os dois círculos concêntricos dentro do mesmo plano, distanciados em 0,03 mm.

Figura 31 – Tolerância de circularidade de 0,03 mm



Fonte: ABNT NBR 6409 (1997).

Segundo Novaski (2013) existem quatro métodos distintos para a determinação da circularidade, são eles: Zona Mínima de Tolerância (*MZC-Minimum Zone Circles*); Máximo Círculo Inscrito (*MIC-"Maximum Inscribed Circle"*); Mínimo Círculo Circunscrito (*MCC "Minimum Circumscribed Circle"*) e círculo obtido por mínimos quadrados (*LSC-"Least Square Circle"*).

Este trabalho utilizou o método de círculo obtido por mínimos quadrados (*LSC-"Least Square Circle"*) para realizar as medições de circularidade. Este método apresenta a vantagem de ser um método simples e poder ser usado para qualquer geometria (NOVASKI, 2013).

O método consiste em calcular o centro de uma circunferência de tal maneira que o quadrado da soma das distâncias dos pontos medidos até a circunferência seja o mínimo possível, para tanto é necessário derivar a equação da circunferência e igualar a zero, equação (7) e (8) calcula o centro da circunferência (NOVASKI, 2013).

$$X_c = \sum_{i=1}^n \frac{2X_i}{n} \quad (7)$$

$$Y_c = \sum_{i=1}^n \frac{2Y_i}{n} \quad (8)$$

## 4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

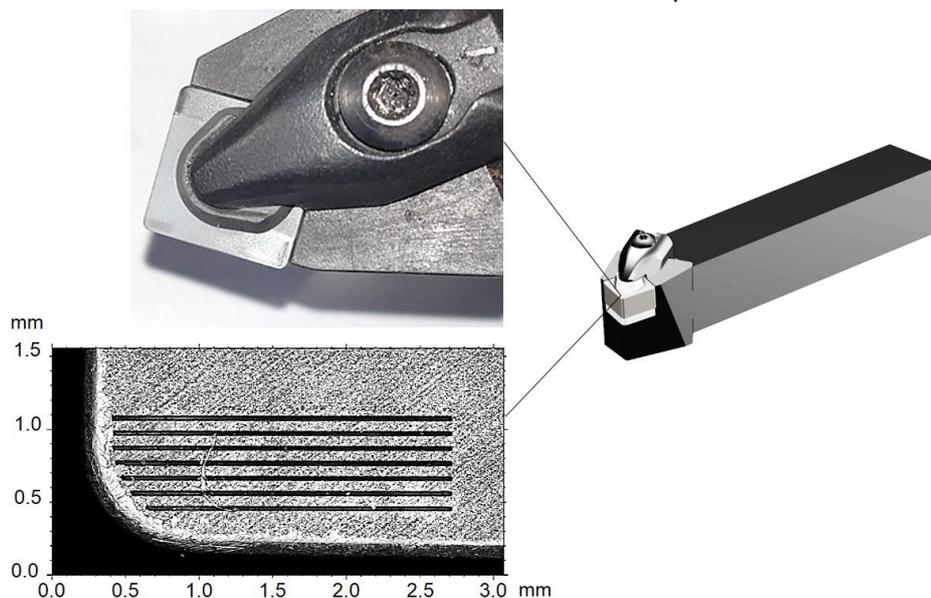
O item está dividido em especificação da ferramenta cerâmica e caracterização da textura, metodologia para ensaio de usinagem, medição de rugosidade e circularidade, além de ensaio de microabrasão.

### 4.1 ESPECIFICAÇÃO E TEXTURIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CORTE

As ferramentas de corte utilizadas neste estudo são de material cerâmico e sem revestimento, a base de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com adições de  $\text{ZrO}_2$  e  $\text{MgO}$ . A especificação do inserto é SNGN 120708, classe KA30 (Kyocera). Os insertos tiveram regiões da superfície de saída ( $A\gamma$ ) texturizadas em uma estação de laser modelo 10K (Femtolasers), com meio de Ti:Safira que gera pulsos ultracurtos na escala de femtossegundos ( $10^{-15}$  s), a partir de um amplificador modelo HR (Femtopower). A condição de ablação para o dado laser com comprimento de onda de 785  $\mu\text{m}$  foi mantida constante com energia por pulso de 7  $\mu\text{J}$ , duração dos pulsos de 30 fs, frequência de 10 kHz, velocidade de deslocamento do feixe de 5 mm/s e distância focal em relação a peça de 20 mm.

Como a ferramenta possui um formato quadrado, ela tem quatro arestas de corte por superfície de saída. Assim, foram texturizadas quatro regiões próximas as arestas de corte de apenas uma superfície de saída. As ferramentas com e sem textura foram montadas em um suporte CSRNR 2525M 12-4 (Sandvik) para ensaios comparativos de usinagem. Na Figura 32 é ilustrado uma ferramenta texturizada montada no suporte.

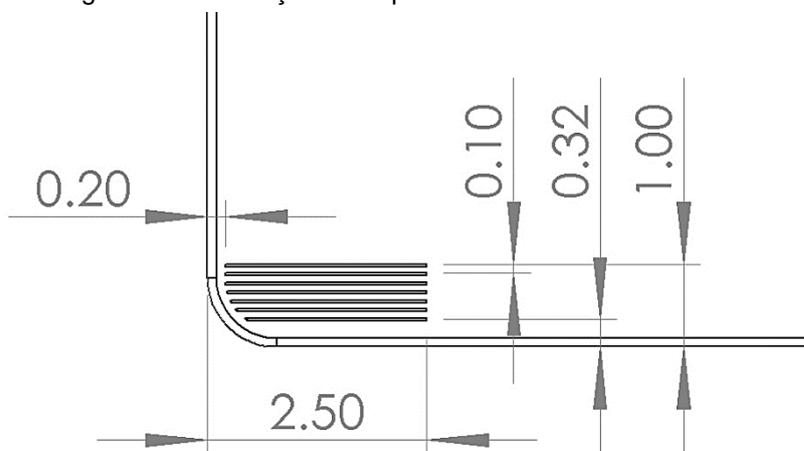
Figura 32 – Pastilha de cerâmica texturizada montada no suporte CSRNR 2525M 12-4



Fonte: Produção do próprio autor.

Para a texturização com laser de femtossegundos, um modelo CAD foi criado, com os detalhes dimensionais das texturas. Posteriormente, foi desenvolvido um programa CNC via sistema CAM para controle da trajetória do feixe de laser. Desta forma foi realizado um padrão de textura com ranhura reta, paralela à aresta principal de corte e sobre superfície de saída das ferramentas. Na Figura 33 tem-se os aspectos dimensionais idealizados para a ferramenta texturizada. Nota-se a textura a 0,32 mm da aresta principal de corte, a 0,20 mm da aresta secundária, passo entre os canais de 0,10 mm e as ranhuras terminam a 2,5 mm da aresta secundária.

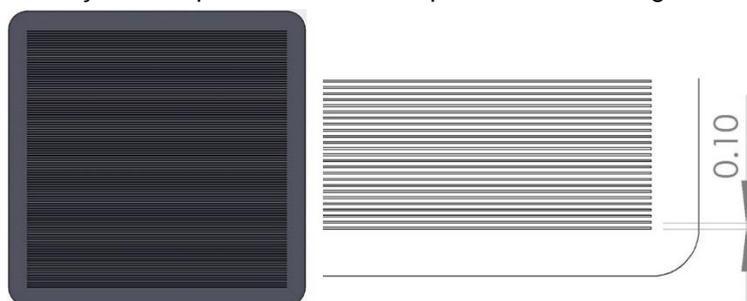
Figura 33 – Ilustração de aspectos dimensionais da textura



Fonte: Produção do próprio autor.

Também foram realizados ensaios tribológicos de microabrasão, comparando a resistência ao desgaste de uma superfície lisa (referência) e uma texturizada. O material de ensaio também foi o inserto cerâmico SNGN 120708, classe KA30 (Kyocera), cuja a superfície de saída ( $A\gamma$ ) foi totalmente texturizada, ver Figura 34. As condições de microusinagem por laser não foram alteradas, incluindo o passo entre as ranhuras.

Figura 34 – Ilustração da superfície texturizada para ensaio tribológico de microabrasão

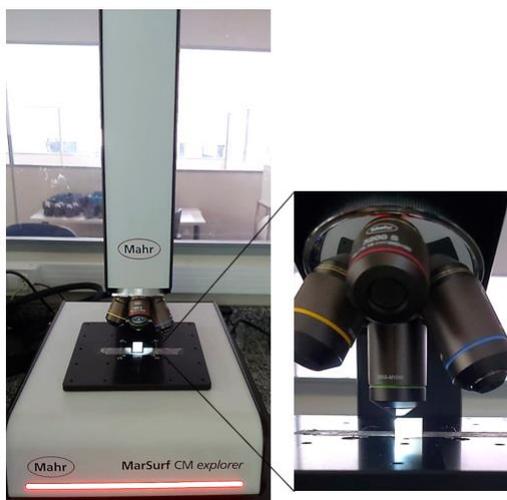


Fonte: Produção do próprio autor.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS TEXTURAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA 3D

Após a texturização das ferramentas com laser de femtossegundos foram feitas medições das características dimensionais das texturas. O equipamento utilizado para a caracterização das amostras texturizadas foi um microscópio óptico 3D, modelo CM Explorer, do fabricante Mahr. Para a aquisição dos pontos topográficos, o equipamento utiliza o método confocal, com câmera HDR (alta definição). A estratégia consiste de uma fonte de luz que é focada através de um disco multiperfurado (multi-pinhole-disc) e por uma lente objetiva sobre a peça. O feixe de luz é refletido de volta em direção ao sistema de medição. Em cada orifício do disco, a luz refletida é reduzida para a porção que está no foco. Na sequência, a luz do feixe é defletida por um divisor e capturada pela câmera de alta definição. Por causa da rotação do disco multiperfurado a superfície é escaneada integralmente, sem interferência por espalhamento de luz. Na Figura 35 tem-se a imagem do equipamento.

Figura 35 – Microscópio óptico 3D, modelo CM Explorer (Mahr)

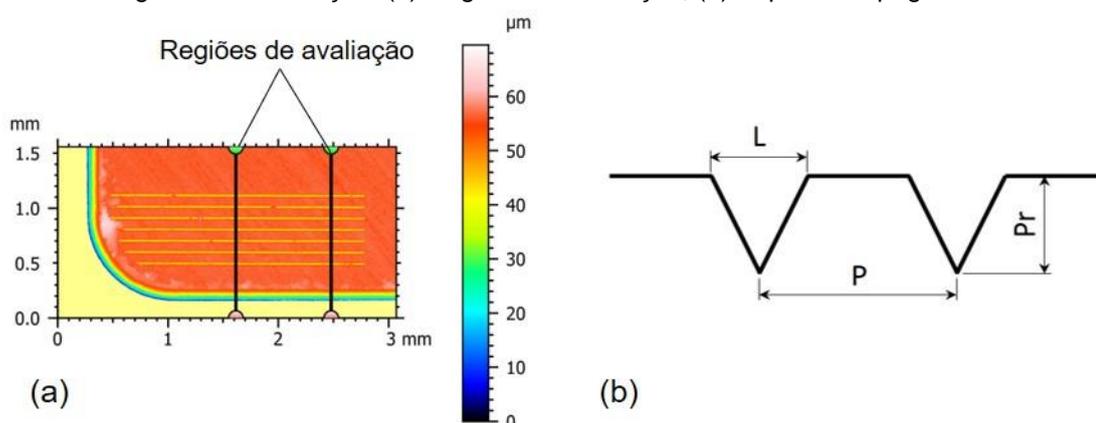


Fonte: Produção do próprio autor.

A ampliação da lente objetiva selecionada foi de 50x, que tem capacidade de avaliar uma área de 0,320 x 0,320 mm. A área definida para a caracterização foi de 1,5 x 3,0 mm. Assim, foi necessário um arranjo 5 x 10 para a construção da imagem a partir da área menor.

As medidas das características geométricas dos aspectos topográficos foram feitas em duas regiões da área de caracterização por aresta, como ilustrado na Figura 36 (a). Os aspectos topográficos avaliados foram profundidade (Pr), largura (L) e passo (P) entre as ranhuras, ver Figura 36 (b). O número de observações para a análise estatística descritiva das características dimensionais da textura decorreu da região texturizada contendo sete ranhuras, vezes duas regiões de análise por aresta, vezes quatro arestas, totalizando 56 observações. Diante da limitação de equipamento e do tempo gasto para a coleta de dados, das quatro ferramentas texturizadas, uma passou pela caracterização dimensional. Logo, faz-se a hipótese de que os aspectos avaliados reproduzem as características das outras ferramentas, ou seja, não existe diferença entre elas.

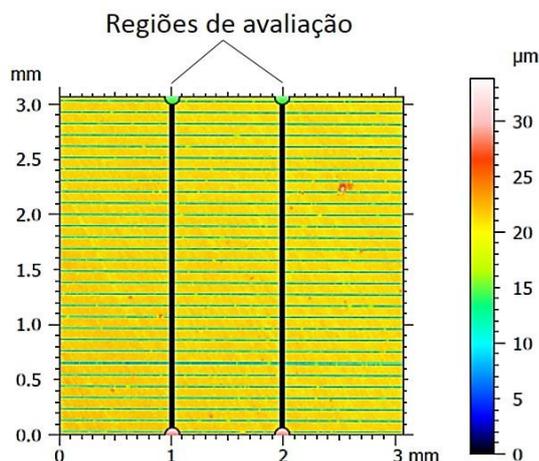
Figura 36 – Ilustração: (a) Regiões de avaliação; (b) Aspectos topográficos



Fonte: Produção do próprio autor.

Para a caracterização da textura na amostra para ensaio tribológico, ver Figura 37, foi utilizado uma lente de 20x, capaz de avaliar uma área de 0,750 x 0,750 mm. A área definida para a caracterização da amostra foi de 3 x 3 mm. Assim, formou-se uma imagem para a avaliação dos aspectos dimensionais da textura a partir de um arranjo 4 x 4 da área menor. Foram avaliadas duas regiões totalizando 60 observações.

Figura 37 – Regiões de avaliação dos aspectos dimensionais para amostra texturizada para ensaio tribológico



Fonte: Produção do próprio autor.

### 4.3 METODOLOGIA PARA ENSAIOS DE USINAGEM

Os materiais de trabalho que foram usinados para estudar o desempenho das ferramentas cerâmicas texturizadas foram barras de ferro fundido cinzento FC250 (Tupy S.A.) e de aço inoxidável martensítico (VSM13) da Villares Metals S.A.

O FC250 gera cavacos curtos (descontínuos), próprio de materiais frágeis. Possui uma matriz perlítica com grafita na forma de veios, sendo utilizado em bloco de motor, discos de freio e base máquinas. Sua dureza média é de 200 HV e a sua composição química pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química do FC250

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Sn</b>	<b>Cu</b>
3,03	2,53	0,46	0,06	0,13	0,11	0,01	0,17

Fonte: Carneiro (2014).

O VSM13 é um material que tem comportamento dúctil, logo gera cavacos longos, que pode ainda sofrer grandes deformações em estreitas bandas de cisalhamento, tornando-se cavacos segmentados. É um aço com estrutura martensítica, utilizado em tubulações na indústria de petróleo e gás, açúcar e álcool e mecânica. Este material possui dureza média de 274 HV e a sua composição química pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química do VSM13

<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>
0,13	12,3	86,3	0,53	0,35

Fonte: Barbosa (2014).

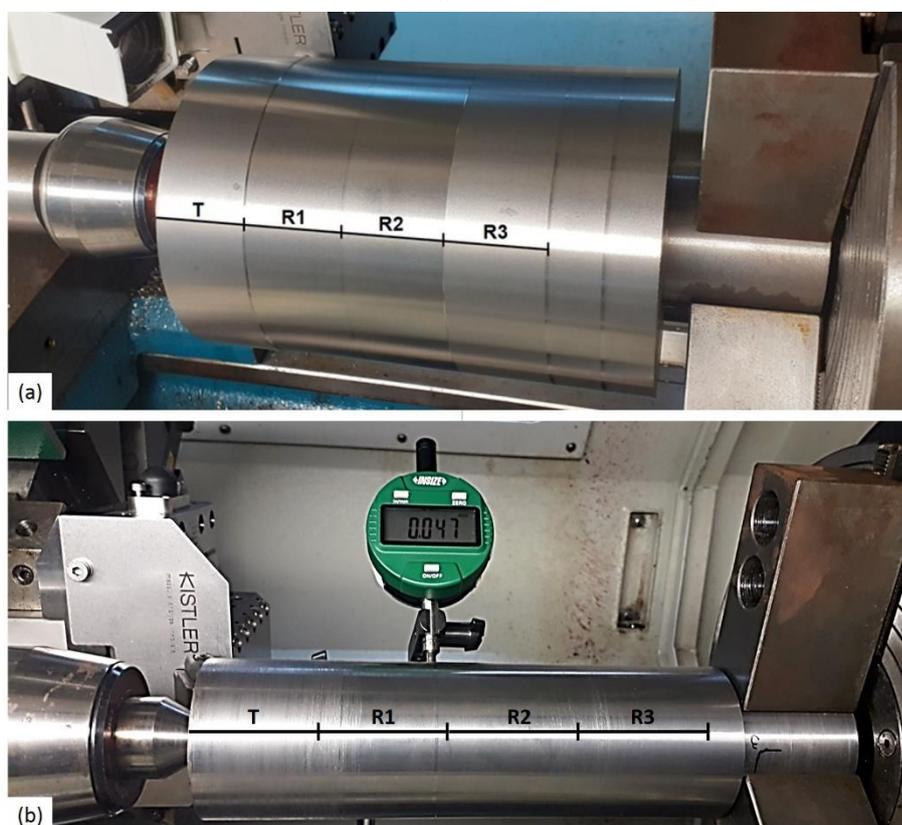
Foram preparados 4 corpos de prova (barras) para os ensaios de usinagem, dois de ferro fundido cinzento e dois de aço inoxidável martensítico. Cada par de barra foi utilizada para uma ferramenta sem textura (referência) e com textura.

As barras de FC250 possuíam diâmetro de 131 mm e comprimento útil de 170 mm. As barras de VSM13 possuíam diâmetro de 63 mm e comprimento útil também de 170 mm. A operação de usinagem escolhida para realizar os ensaios foi o torneamento cilíndrico externo. Para tanto a máquina-ferramenta utilizada foi um torno CNC Centur 35D (Romi) de 3000 rpm e 11 kW. Cada ensaio consistiu de um

teste (T) e três réplicas (R1, R2 e R3). Todos os ensaios foram executados a seco (sem fluido de corte). Como cada ferramenta de corte possuía quatro arestas de corte por superfície de saída, uma aresta nova foi utilizada a cada teste ou réplica. Assim, cada barra recebeu uma sequência de testes para ferramenta de referência e texturizada. As barras foram fixadas na placa de três castanhas do torno e apoiadas em contra-ponta. É importante citar que ao fazer a fixação das peças o desvio de batimento circular, monitorado com relógio comparador digital 2112 (Insize) de resolução 0,001 mm, foi inferior a 50  $\mu\text{m}$ . Na Figura 38, tem-se imagens da fixação das barras e com a indicação dos testes e réplicas.

Os parâmetros de corte utilizados para os ensaios no FC250 estão apresentados na Tabela 4 de experimentos. A velocidade de corte ( $v_c$ ) e a profundidade de corte ( $a_p$ ) foram mantidos constantes, enquanto a ferramenta de corte e o avanço ( $f$ ) variaram. O percurso de avanço ( $L_f$ ) para cada teste e réplicas foi de 40 mm. As condições de corte foram definidas a partir de parâmetros médios sugeridos pelo fabricante das ferramentas.

Figura 38 – Fixação da barra. (a) FC250 e indicação dos testes; (b) VSM13 indicação dos testes e batimento



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 4 – Matriz de experimentos para ensaio de usinagem no FC250

<b>Ferramenta</b>	<b><math>v_c</math> [m/min]</b>	<b><math>a_p</math> [mm]</b>	<b><math>f</math> [mm/volta]</b>		<b><math>L_f</math> [mm]</b>
Referência	500	2	0,20	0,25	40
Texturizada	500	2	0,20	0,25	40

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 5 tem-se a matriz de experimentos com os parâmetros de corte para o ensaio no VSM13. Para este material o  $L_f$  foi de 30 mm para diminuir os efeitos do cavaco enrolar na peça, provendo a interrupção do ensaio e/ou a avaria da ferramenta. As condições de corte foram determinadas a partir da análise dos trabalhos de Kumar, Durai e Sornakumar (2006a,b), além de pré-testes.

Tabela 5 – Matriz de experimentos para ensaio de usinagem no VSM13

<b>Ferramenta</b>	<b><math>v_c</math> [m/min]</b>	<b><math>a_p</math> [mm]</b>	<b><math>f</math> [mm/volta]</b>		<b><math>L_f</math> [mm]</b>
Referência	400	2	0,20	0,25	30
Texturizada	400	2	0,20	0,25	30

Fonte: Produção do próprio autor.

Os materiais da peça se justificam para o estudo do desempenho de ferramenta cerâmica texturizada, porque o FC250 gera cavaco descontínuo, enquanto o VSM13 gera cavaco segmentado, logo tem-se diferentes interfaces cavaco-ferramenta. Além disso, de acordo com Machado et al. (2021), não existe na literatura muitos trabalhos avaliando os efeitos da texturização para os materiais da peça e da ferramenta escolhidos, logo existe uma lacuna de conhecimento.

As ferramentas de corte utilizadas neste ensaio foram montadas em um suporte CSRNR 2525M 12-4 (Sandvik), que conferiu uma geometria de corte com ângulo de posição ( $\chi_r$ ) de  $75^\circ$ , ângulo de saída ( $\gamma_o$ ) de  $-6^\circ$ , ângulo de folga ( $\alpha_o$ ) de  $6^\circ$  e ângulo de inclinação ( $\lambda_s$ ) de  $-6^\circ$ .

Sinais dos esforços de corte ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) foram adquiridos para todos os materiais de peça, utilizando um dinamômetro composto de plataforma piezoelétrica modelo 9129, condicionador de sinal modelo 5080A e sistema de aquisição de dados modelo 5697A1, todos da marca Kistler. A incerteza de medição do equipamento é  $\pm 2\%$ . A taxa de aquisição de sinais foi de 1000 Hz. Os resultados foram analisados a partir da força de usinagem ( $F_u$ ), que é a resultante das componentes ortogonais monitoradas pelo equipamento, ver equação (9).

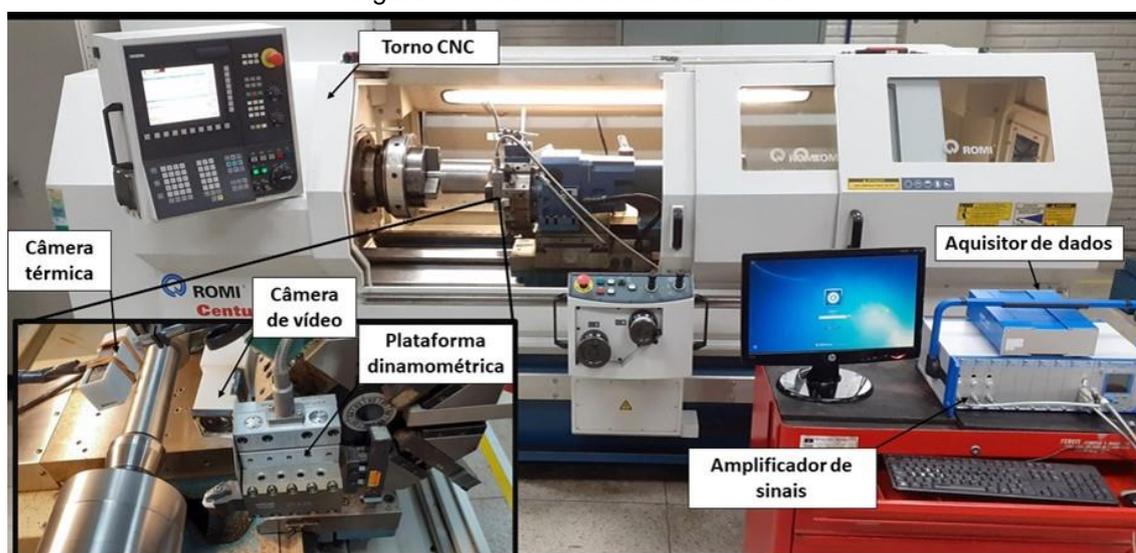
$$F_u = \sqrt{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)} \quad (9)$$

Uma câmera térmica, UTi120Mobile (UNI-T) foi utilizada para realizar o monitoramento da temperatura de corte nas peças de trabalho de ferro fundido cinzento. A incerteza de medição do equipamento é  $\pm 2\%$ . Para tanto a emissividade ( $\epsilon$ ) foi configurada em 0,21 ferro fundido não-oxidado (KLEINS TOOLS, 2023) e o sensor foi posicionado a uma distância de 220 mm da superfície de saída ferramenta. O monitoramento foi feito para um Lf de 160 mm, o que permitiu realizar 53 observações. Todavia, a avaliação da temperatura durante a usinagem do aço inoxidável martensítico não foi executada por limitação experimental. Periodicamente o equipamento faz autocalibração, ocorre que o cavaco enrola na peça para um Lf em torno de 30 mm, tornando assim a aquisição inviável.

Uma câmera de 330 fps modelo KYT-U400-CSM (Kayeton) foi utilizada para a filmagem da formação do cavaco, a fim de se registrar alguma variação causada pela textura.

Na Figura 39 tem-se o torno CNC instrumentado com o dinamômetro, câmera térmica e de vídeo.

Figura 39 – Torno CNC instrumentado



Fonte: Produção do próprio autor.

O grau de recalque ( $R_c$ ) foi avaliado nos cavacos gerados a partir da usinagem do aço inoxidável martensítico. O objetivo foi verificar a existência de alterações na deformação cavaco, causadas pelas texturas criadas na superfície de saída das ferramentas testadas. Para isto foram feitas quatro medidas da espessura do cavaco

para cada ensaio (T, R1, R2 e R3), utilizando um micrômetro digital com faixa de medição de 0 a 25 mm, com resolução de 0,001 mm (DIGIMESS), ver Figura 40.

Na equação (10) tem-se o cálculo do  $R_c$  (grau de racalque), em que  $h'$  é a espessura do cavaco medido e  $h$  é a espessura de corte, neste caso,  $h = f \cdot \text{sen} \chi_r$ , sendo  $f = 0,20$  ou  $0,25$  mm/volta e  $\chi_r = 75^\circ$ .

$$R_c = \frac{h'}{h} \quad (10)$$

Figura 40 – Micrômetro e suporte para a medição da espessura dos cavacos

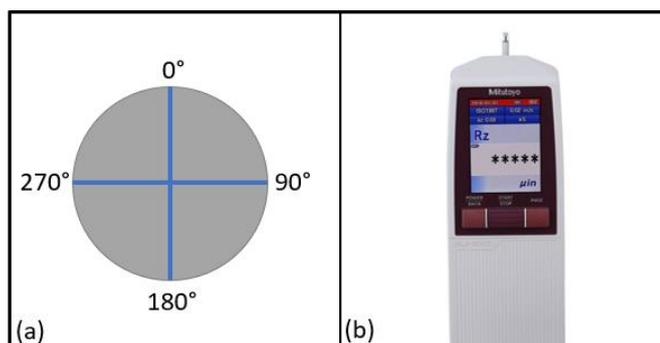


Fonte: Produção do próprio autor.

#### 4.4 METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE DESVIOS DE RUGOSIDADE E DE CIRCULARIDADE

A rugosidade das barras foi avaliada através dos parâmetros ( $R_a$  e  $R_z$ ).  $R_a$  é a média dos valores absolutos dos desvios de altura no comprimento de amostragem.  $R_z$  avalia a média dos cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos ao longo do comprimento de avaliação do perfil. Para tanto, foi utilizado um rugosímetro portátil, modelo SurfTest SJ-210 (Mitutoyo), ver Figura 46 (b). Os testes foram amparados pela norma ABNT NBR ISO 4288:2008, assim o rugosímetro foi configurado para um comprimento de amostragem de 0,8 mm (cut-off). A rugosidade foi avaliada em quatro posições diferentes, distantes de  $90^\circ$ , para cada teste e réplicas, ver Figura 41 (a).

Figura 41 – Rugosidade. (a) Posição para a medição dos parâmetros de rugosidade na peça; (b) Rugosímetro modelo SurfTest SJ-210 (Mitutoyo).



Fonte: Produção do próprio autor.

Desvios macrogeométricos de circularidade foram medidos nas peças de trabalho (barras) em uma máquina de medição de forma MMQ 200 (Mahr), com exatidão de  $\pm 0,015 \mu\text{m}$ , apalpador automático (CNC), modelo T7W, com ponta de aço de 3 mm de diâmetro. Na Figura 42 tem-se a imagem do equipamento.

Figura 42 – Máquina de desvio de forma MMQ 200 (Mahr)



Fonte: Produção do próprio autor.

A máquina adquiriu pontos em 5 planos diferentes dentro do comprimento usinado ( $L_f$ ) para cada teste e suas réplicas. As medições seguiram o critério de cálculo dos mínimos quadrados LSC (Least Square Center). Para o FC250 utilizou-se filtro de ondulações de 1-500 UPR (Undulations Per Revolution), enquanto que para o VSM13 o filtro de ondulações de 1-150 UPR (Undulations Per Revolution), devido a

diferença no diâmetro das barras, mas conforme recomendação da norma ISO 12181:2011.

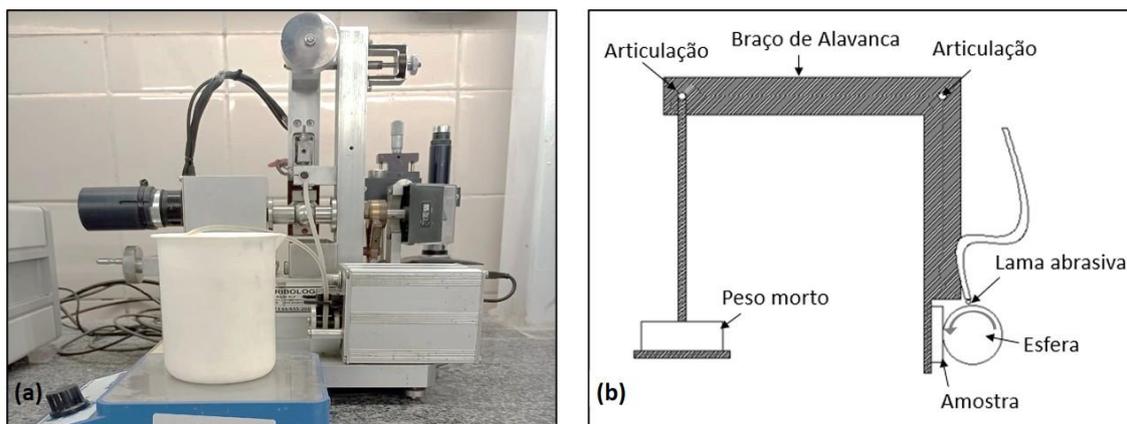
Cabe ressaltar, que para o VSM13, não foi possível gerar dados de rugosidade e circularidade para os ensaios T e R1, devido ao excesso de vibração no início da barra, principalmente para o  $f = 0,25$  mm/volta. Inviabilizando, dessa forma, as medições. Para manter o padrão, os dados de força e grau de recalque para T e R1 também foram desconsiderados da análise. Mesmo assim, todos os dados de  $F_u$ , grau de recalque, rugosidade e circularidade foram avaliados por análise de variância (ANOVA) com duas classificações (Two Way), permitindo ainda avaliação de interação.

#### 4.5 METODOLOGIA PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE MICROABRASÃO

Nos ensaios de microabrasão, na configuração esfera-fixa contra plano, foram avaliados a resistência ao desgaste microabrasivo das superfícies de saída das ferramentas cerâmicas de referência (não texturizada) e texturizada. Para tanto foi utilizado um microabrasômetro modelo TE 66 (Plint). E como contra corpo foi utilizada uma esfera de aço inoxidável martensítico 440C de diâmetro de 25,4 mm.

As amostras das ferramentas de corte foram embutidas de forma a deixar as superfícies de saída expostas. A amostra texturizada foi posicionada no equipamento de modo que o sentido de rotação da esfera (contra-corpo) estivesse perpendicular à direção do padrão da textura. A Figura 43 (a) mostra o equipamento utilizado e o esquema de configuração do ensaio microabrasivo pode ser visto na Figura 43 (b). O peso morto atua promovendo o carregamento normal da amostra (plano) sobre a esfera. O ensaio ocorre com lama abrasiva para promover o desgaste.

Figura 43 – Ensaio de microabrasão. (a) Microabrasômetro; (b) Configuração esquemática do microabrasômetro



Fonte: Produção do próprio autor.

Os parâmetros de ensaio foram definidos com base em trabalhos anteriores (MELO, 2018; ESTEVES, 2015) e no Guia de Boas Práticas de Medição N° 57 da NPL – “*National Physical Laboratory*” (GEE et al., 2002), e podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros para o ensaio de microabrasão

Carga normal	1,25 N
Velocidade de rotação da esfera	80 rpm
Distância total deslizada	754,5 m
Lama abrasiva (SiC – H <sub>2</sub> O)	0,064 g/cm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O
Taxa de gotejamento	25-30 gotas/min
Tamanho do abrasivo	F1000

Fonte: Produção do próprio autor.

A resistência ao desgaste microabrasivo ( $K^{-1}$ ) foi calculada utilizando a lei de desgaste de Archard (RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1996; YAHYA; TODD, 2012), equação (11).

$$K^{-1} = \frac{SN}{\pi b^4 / 6R} \quad (11)$$

Em que  $b$  é o diâmetro da cratera de desgaste,  $R$  é o raio da esfera utilizada,  $S$  é a distância deslizada e  $N$  é a carga normal aplicada.

O ensaio foi executado com o auxílio do *software Compend 2000 V2.23*. A cada 50,3 m de deslizamento, o ensaio era interrompido para medição do diâmetro da calota de desgaste, através do *software de captura da imagem Capture®-v.4* e do *software de análise Infinity Analyser®-v.4*, com a finalidade de acompanhar o

desenvolvimento da formação da calota de desgaste e verificar a obtenção do regime permanente. Para tanto, foram realizadas 15 pausas a cada ensaio. Após a medição da calota de desgaste o ensaio prosseguia sem alteração nos parâmetros. Ao final do ensaio, a amostra cerâmica era levada ao microscópio óptico Nikon Eclipse MA200, ilustrado na Figura 44, para ser feita a medida da última calota de desgaste para corrigir o erro sistemático do software *Infinity Analyser*®-v.4. Foram executados um teste e duas réplicas para cada amostra, referência e texturizada.

Figura 44 – Nikon Eclipse MA200



Fonte: Produção do próprio autor.

Os micromecanismos de desgaste foram avaliados em microscópio eletrônico de varredura (MEV) Quanta FEG650 (FEI) com detector de espectro de energia dispersiva (EDS) Quantax (Bruker).

## 5 RESULTADOS

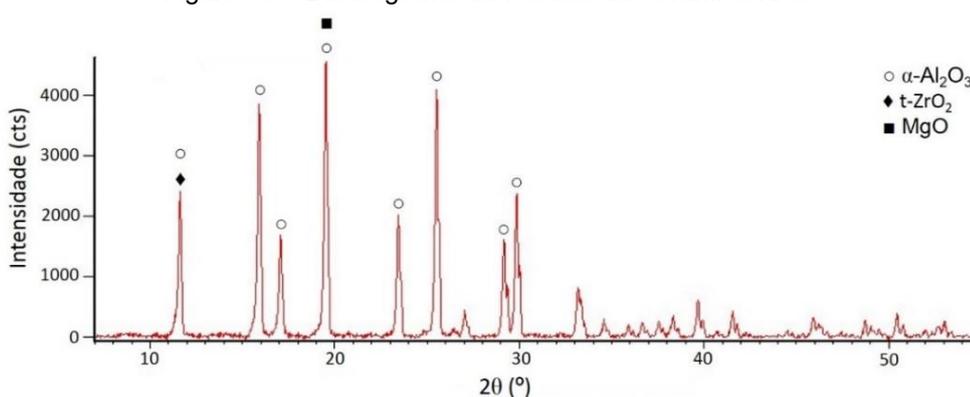
### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA DE CORTE

Este item está dividido em caracterização do material da ferramenta por difração de raios-X e dos aspectos dimensionais da textura.

#### 5.1.1 Caracterização da ferramenta por difração de raios-X (DRX).

A ferramenta de corte utilizada neste trabalho foi uma cerâmica a base de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), contendo adições de óxido de zircônio ( $\text{ZrO}_2$ ) e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ). Na Figura 45 tem-se o resultado da difração de raios-X executado na ferramenta cerâmica. Nota-se os principais picos de  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  nas posições  $2\theta$ :  $11,636^\circ$ ,  $15,908^\circ$ ,  $19,516^\circ$  e  $25,515^\circ$ . Enquanto que o principal pico para a zircônia tetragonal ( $t\text{-ZrO}_2$ ) foi identificado na posição  $11,636^\circ$  e para o  $\text{MgO}$  em  $19,516^\circ$ . A mistura dos pós de óxido de magnésio com zircônia monoclinica ( $m\text{-ZrO}_2$ ) forma uma solução sólida. De modo que, o  $\text{MgO}$  estabiliza a fase metaestável tetragonal da zircônia ( $t\text{-ZrO}_2$ ) a temperatura ambiente. Durante a sinterização a  $\text{ZrO}_2$  sofre uma transformação polimórfica da fase monoclinica para a tetragonal. A fase  $t\text{-ZrO}_2$  se mantém metaestável a temperatura ambiente, promovendo a tenacificação do compósito cerâmico. A ação mecânica de propagação da trinca faz com que ocorra o polimorfismo da fase tetragonal para a monoclinica, provocando mudança de volume (expansão) com efeito de compressão da ponta da trinca, o que dificulta seu mecanismo de propagação (MEYERS; CHAWLA, 2009; BONIECKI et al., 2017).

Figura 45 – Difratoograma da ferramenta cerâmica KA30

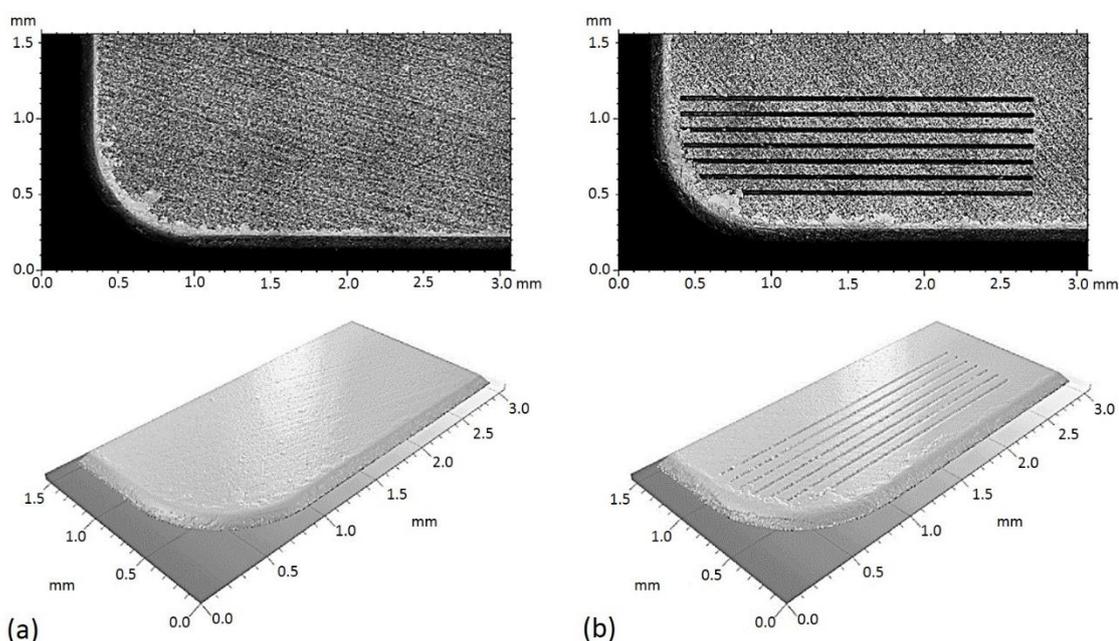


Fonte: Produção do próprio autor.

### 5.1.2 Caracterização dimensional da textura

Na Figura 46 tem-se imagens representativas 2D e 3D das ferramentas cerâmicas, feitas em microscópio confocal para os ensaios de usinagem. Na Figura 46 (a) tem-se a ferramenta de referência com a superfície de saída ( $A\gamma$ ) lisa. Na Figura 46 (b) observa-se a textura está posicionada sobre  $A\gamma$  e com as ranhuras paralelas a aresta principal de corte.

Figura 46 – Microscopia confocal. (a) Ferramenta de referência; (b) Ferramenta texturizada

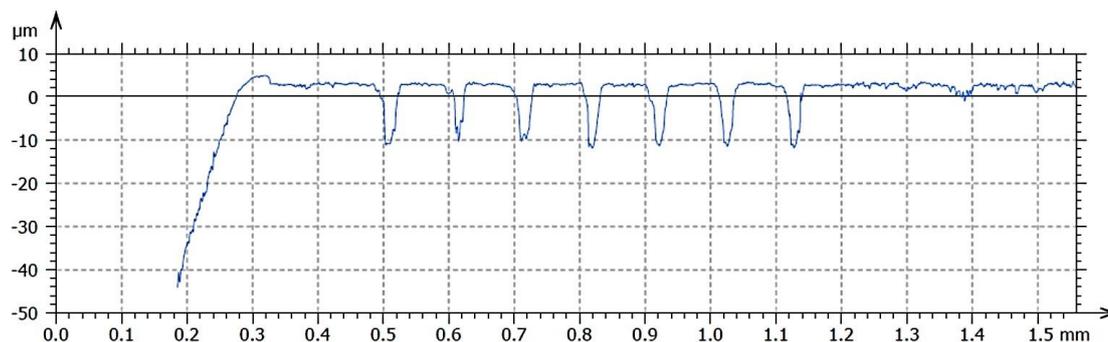


Fonte: Produção do próprio autor.

Também é importante citar que as ranhuras que compunham a textura tinham um perfil em “V”, conforme pode ser observado na Figura 47.

Como o equipamento é capaz de fazer medições topográficas, na Tabela 7 tem-se a estatística descritiva dos aspectos dimensionais da textura (profundidade, largura e passo das ranhuras) das quatro arestas da ferramenta avaliada. Dessa forma, considera-se que os dados levantados caracterizam o padrão da ferramenta.

Figura 47 – Perfil topográfico em V da textura



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 7 – Estatística descritiva dos aspectos dimensionais da textura, unidade dimensional em  $\mu\text{m}$ 

Aspectos	N	Média	IC-95%	IC+95%	Desvio-padrão
<b>Profundidade</b>	56	13,408	13,081	13,736	1,223
<b>Largura</b>	55	25,551	24,305	26,797	4,608
<b>Passo</b>	48	103,088	102,595	103,580	1,696

N é número de observações

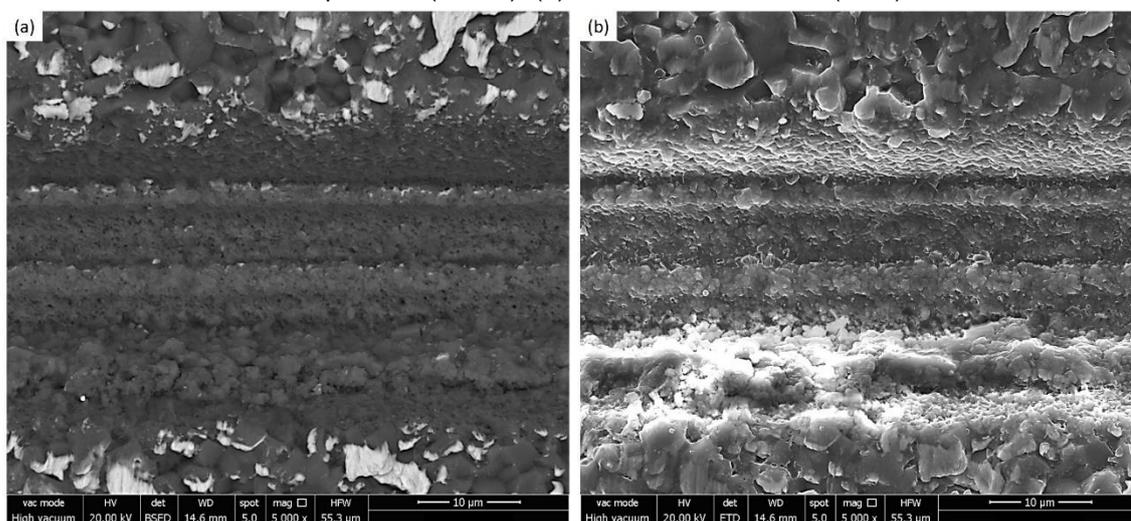
Fonte: Produção do próprio autor.

De acordo com a Tabela 7, nota-se que a textura tem profundidade média de 13,408  $\mu\text{m}$ , com intervalo de confiança de 95% (IC95%) entre 13,081 e 13,736  $\mu\text{m}$ , e desvio-padrão de 1,223  $\mu\text{m}$ . A largura média da textura foi de 25,551  $\mu\text{m}$ , IC95% entre 24,305 e 26,797  $\mu\text{m}$ , e desvio-padrão de 4,608  $\mu\text{m}$ . O maior desvio-padrão para este aspecto dimensional pode estar relacionado a variações do diâmetro do feixe de laser na interação com matéria (fases, orientação dos grãos). O valor médio do passo entre as ranhuras foi de 103,088  $\mu\text{m}$ , com IC95% entre 102,595 e 103,580  $\mu\text{m}$  e desvio-padrão de 1,696  $\mu\text{m}$ . Este resultado tem forte influência da precisão dos estágios de deslocamento CNC. De maneira geral, os resultados médios, IC e desvio-padrão em escala micrométrica ratificam a precisão dos lasers de femtossegundos, bem como a sua aplicação em microusinagem. He et al. (2015) citam que uma das diversas vantagens do laser de pulso ultracurto sobre demais é o seu alto grau repetibilidade e elevada precisão, principalmente quando os eixos do equipamento são controlados por CNC, fazendo dos lasers de femtossegundos uma ferramenta bastante versátil.

Na Figura 48 tem-se imagens em MEV com o detector em elétrons retroespalhado (BSED) e elétrons secundários (ETD) que representa a ranhura usinada por laser de femtossegundos. Ao avaliar a imagem da Figura 48 (a) em BSED, não é possível identificar sinais de material fundido, tal como respingos ou gotas. Todavia, na Figura 48 (b) em ETD, a região branca na parte inferior da parede da

ranhura sugere a presença de material fundido e ressolidificado. Os parâmetros de laser utilizados para usinar as microranhuras são compatíveis com a possibilidade de fusão e evaporação do material cerâmico. Inclusive, o processo de remoção de material é, provavelmente, por explosão de fase. O material é fundido e o líquido formado é expulso por uma explosão em que o material líquido atinge a uma temperatura muitas vezes maior que a de evaporação, mas não tem tempo de mudar do estado físico (GAMALY et al., 2002; SAMAD et al., 2012). Logo, durante a explosão é possível que quase todo o material líquido tenha sido expelido. No entanto, uma pequena quantidade de material fundido pode ter ficado aprisionada na parede da ranhura, formando a camada branca em discussão. Como a intensidade de potência do pulso de laser é muito alta, a duração do pulso é muito curta e a quantidade de material ablacionada é muito pequena, então a interação laser-matéria é quase atômica, com mínima difusão térmica para as regiões adjacentes e subsuperficiais, mínima fusão de matéria e mínima ou nenhuma zona afetada pelo calor (WANG et al., 2010; HE et al., 2015).

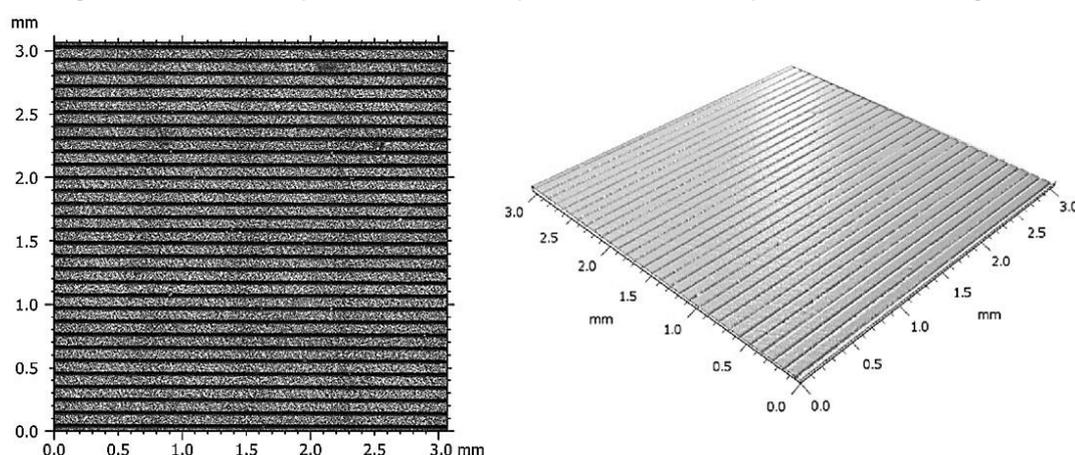
Figura 48 – Imagem em MEV da ranhura usinada a laser de femtossegundos. (a) Elétrons retroespalhado (BSED); (b) Elétrons secundários (ETD)



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 49 tem-se uma imagem representativa 2D e 3D feitas em microscópio confocal das amostras cerâmicas texturizada para a realização de ensaio tribológico.

Figura 49 – Microscopia confocal da superfície texturizada para ensaio tribológico



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 8 tem-se a estatística descritiva dos aspectos dimensionais da textura quanto a profundidade, largura e passo das ranhuras. Ao comparar estes resultados com os da ferramenta de usinagem, nota-se que a maior diferença ocorreu para a profundidade da textura de 1,625  $\mu\text{m}$ . Essa diferença é muito pequena considerando a área texturizada e a dimensão da amostra. Logo, tem-se a evidência de que a hipótese feita, de uma amostra caracterizada representar a demais, é satisfatória.

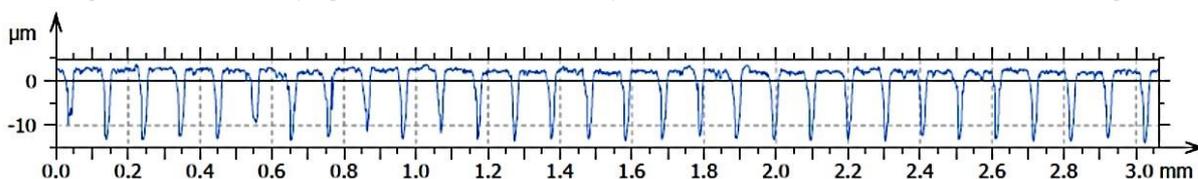
Tabela 8 – Estatística descritiva dos aspectos dimensionais da textura para amostra em ensaio tribológico, unidade dimensional em  $\mu\text{m}$

Aspectos	N	Média	IC-95%	IC+95%	Desvio-padrão
<b>Profundidade</b>	60	15,033	14,752	15,313	1,086
<b>Largura</b>	58	24,681	23,849	25,512	3,162
<b>Passo</b>	58	103,150	102,526	103,774	2,374

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 50 nota-se que o perfil da textura para amostra referente ao ensaio tribológico também possuiu um perfil em “V”.

Figura 50 – Perfil topográfico em V da textura para a amostra referente ao ensaio tribológico



Fonte: Produção do próprio autor.

## 5.2 RESULTADOS DE USINAGEM DO FC250

Neste item descreve-se os resultados de força de usinagem, temperatura de corte, rugosidade e circularidade no torneamento do FC250 com as ferramentas avaliadas.

### 5.2.1 Força de usinagem no FC250

Na Tabela 9 tem-se os dados de Força de usinagem ( $F_u$ ) no torneamento do Ferro fundido cinzento (FC250), considerando Teste (T) e Réplicas de 1 a 3 (R1 a R3), a variação da ferramenta de corte e do avanço.

Tabela 9 – Dados de  $F_u$  para FC250 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em N

	Referência		Texturizada	
	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta
T	802,286	804,688	811,522	823,116
R1	742,677	799,048	838,534	808,607
R2	735,832	793,094	805,190	836,934
R3	781,176	784,529	820,935	829,896
<b>Médias</b>	765,492	795,340	819,045	824,638

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 10 é apresentado a análise de variância para os dados de  $F_u$ . O nível de significância estatística ( $\alpha$ ) para o teste de hipótese foi de 5% (0,05) utilizando a distribuição de Fisher (F). SQ representa o somatório dos quadrados do resíduo, GL o grau de liberdade, QM o quadrado médio ou variância, F é a razão entre a variância do efeito e do erro, e o valor p é calculado a partir do valor F e comparado com o critério  $\alpha$ , os efeitos destacados em vermelho indicam que os resultados encontrados são estatisticamente significativos.

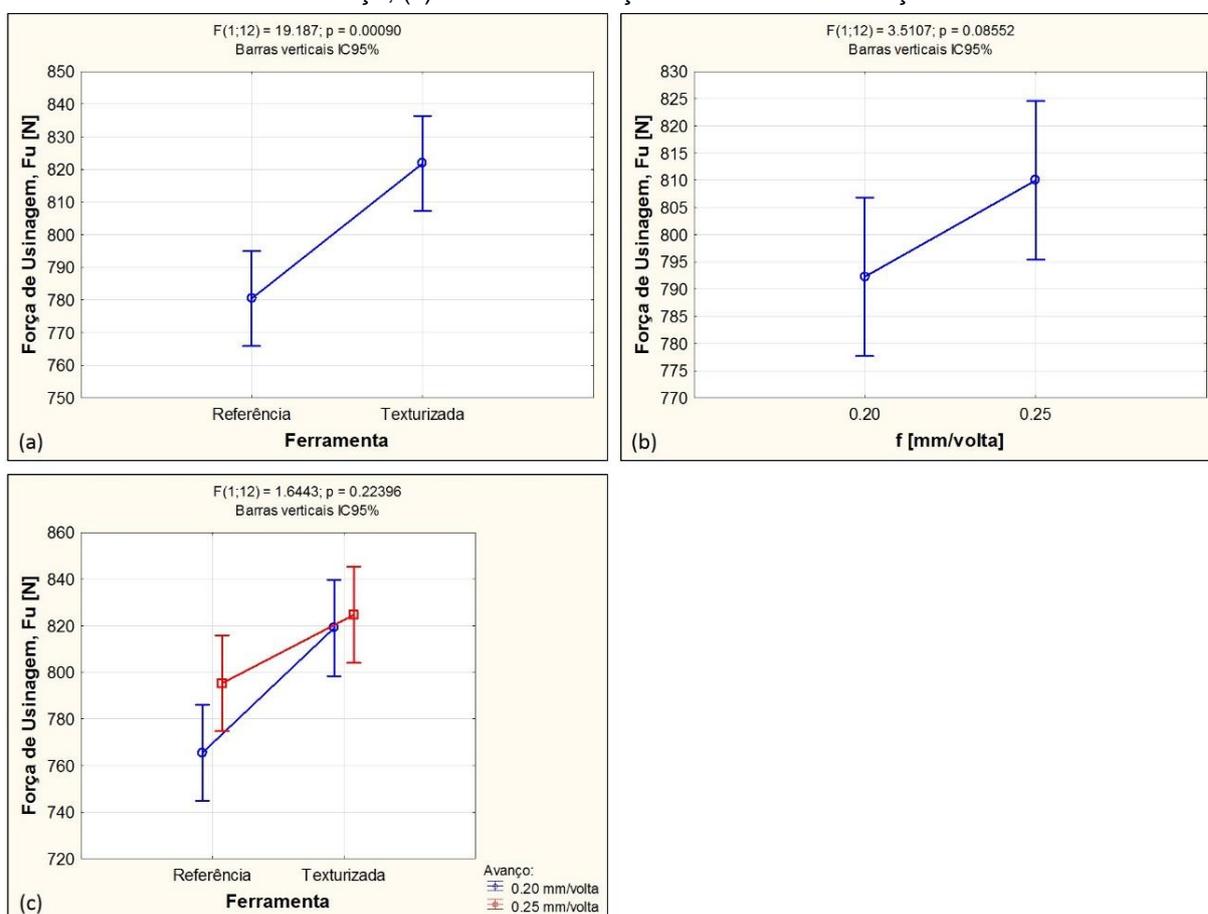
Tabela 10 – ANOVA para os resultados de  $F_u$  no FC250.

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
<b>Média</b>	10268923	1	10268923	28702,98	0,000000
<b>Ferramenta</b>	6864	1	6864	19,19	0,000896
f	1256	1	1256	3,51	0,085525
Ferr. x f	588	1	588	1,64	0,223961
Erro	4293	12	358		

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da Tabela 10 compreende-se que o modelo de estatístico de predição é significativo, pois a variância da Média é maior do que a do Erro. Além disso, nota-se que existe diferença estatística significativa para a variável Ferramenta, pois o valor  $p < \alpha$ . No entanto, para as variáveis  $f$  (avanço) e de interação (Ferr. x  $f$ ) não se observa efeito estatístico ( $p > \alpha$ ). Os resultados ficam mais claros a partir da análise dos gráficos de efeito, ver Figura 51.

Figura 51 – Gráfico de efeito para  $F_u$  no FC250. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço



Fonte: Produção do próprio autor.

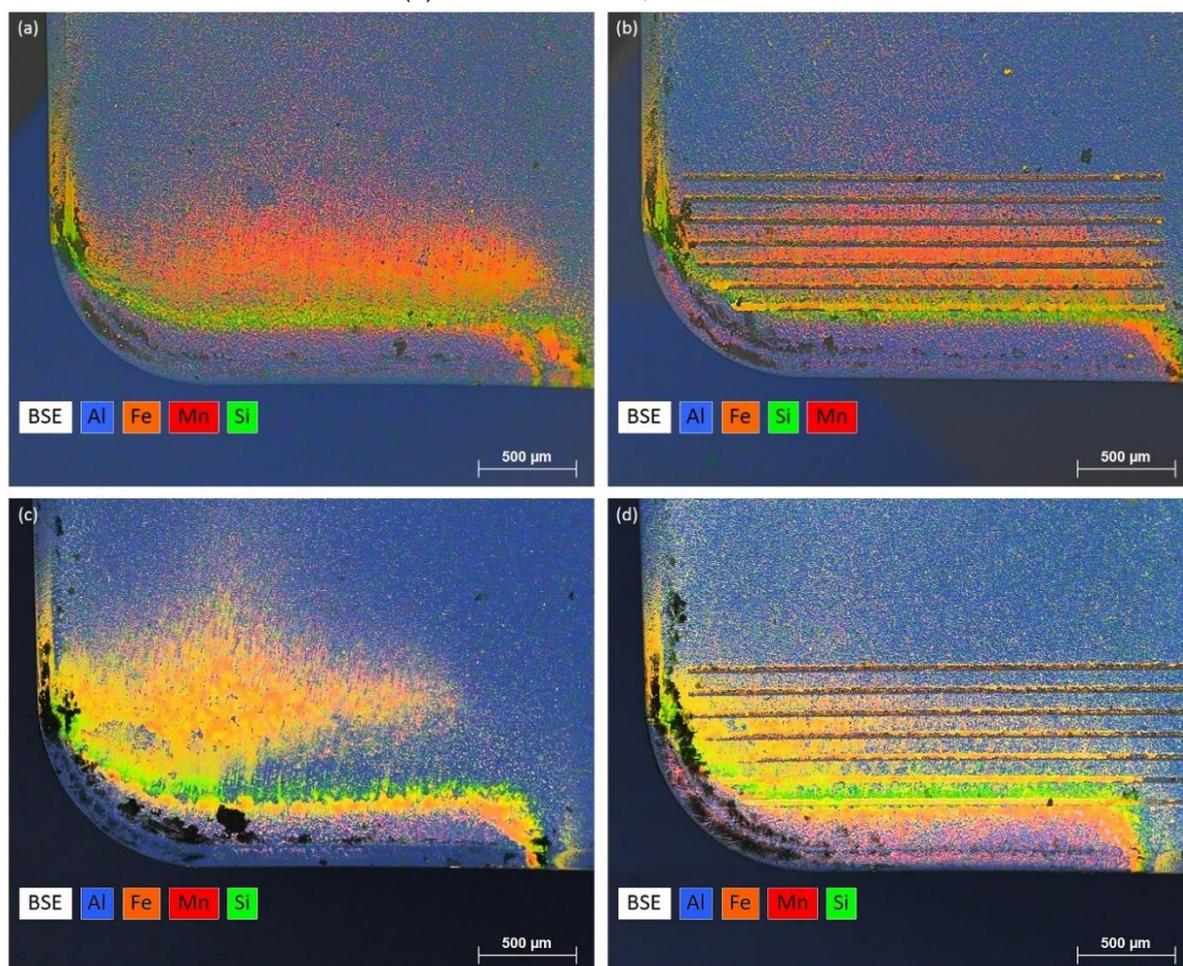
Na Figura 51 (a) tem-se um aumento significativo da  $F_u$  em média de 41 N (5%) da ferramenta de referência para a texturizada. Embora, a diferença seja pequena os resultados indicam que a texturização da ferramenta cerâmica não favoreceu a usinagem do ferro fundido cinzento (FC250). Como esperado, na Figura 51 (b) o aumento do avanço promoveu o aumento da  $F_u$  em média 18 N (2%), devido ao aumento das áreas dos planos de cisalhamento (TRENT; WRIGHT, 2000; SHAW,

2005). Finalmente, na Figura 51 (c) é mostrado a interação Ferr. x f. Nota-se que para  $f = 0,20$  mm/volta a  $F_u$  aumentou em média 7% (54 N) da ferramenta de referência para a texturizada. Enquanto que para  $f = 0,25$  mm/volta o aumento foi de 4% (29 N). Também pode-se observar que em ambos avanços a ferramenta texturizada tem valores médios de  $F_u$  superiores que a ferramenta de referência, todavia o aumento do avanço teve um efeito maior para a ferramenta de referência (30 N ou 4%) do que para a ferramenta texturizada (6 N ou 0,07%). Isso está diretamente relacionado ao menor aumento na força de corte para a ferramenta texturizada (1%) do que na de referência (7,5%).

A Figura 52 pode auxiliar na compreensão da diferença nos valores de  $F_u$  entre as ferramentas de referência e texturizada. Justificar a diferença baseando-se na área de contato cavaco-ferramenta por ser subjetivo, porque os comprimentos de contato são parecidos. Todavia, ao comparar as Figuras 52 (a) e (b) nota-se que na região de contato, mais ao centro da superfície de saída, tem-se uma maior presença dos elementos químicos da barra de ferro para a ferramenta de referência. Por outro lado, apenas a primeira ranhura a partir da aresta principal de corte na ferramenta texturizada está impregnada com o material da peça. É possível observar dentro das ranhuras posteriores, a presença do elemento químico Al, que representa o material da ferramenta ( $Al_2O_3$ ). Embora, a textura possa diminuir ligeiramente a área de contato, isso não foi suficiente para reduzir os esforços de corte. Também não se pode admitir a ocorrência do efeito tribológico de entupimento das texturas com o material da peça (clogging effect) para a diminuição do atrito (BIJWE et al., 2001). No entanto, a maior presença dos elementos da peça de trabalho sobre a superfície de saída da ferramenta de referência, pode ter promovido menor atrito. A menor restrição à formação e movimentação do cavaco tem influência direta nos esforços de corte e, conseqüentemente, na  $F_u$ . Nas Figuras 52 (c) e (d) tem-se a região de contato para as ferramentas de referência e texturizada para o maior avanço testado. Na Figura 51 (d) nota-se mais ranhuras impregnadas com o material da peça, sugerindo nestas condições a influência do efeito tribológico (clogging effect) para a ferramenta texturizada, tendo como consequência menor efeito do aumento do avanço em relação a  $F_u$  para a ferramenta texturizada, quando comparada com a ferramenta de referência, ver Figura 51 (c) interação Ferr x f. É sabido que o material de um corpo (peça) aderido sobre um contra corpo de maior dureza é capaz de diminuir o carregamento mecânico, atrito, desgaste e a abrasividade do sistema em movimento

relativo (GÅHLIN; JACOBSON, 1999). Resultados semelhantes ao observado também foram relatados na literatura. Noveleto et al. (2017) texturizaram ferramentas de cerâmica branca com laser de pulsos ultracurtos com dois padrões de textura paralelo à aresta de corte, mas com passo entre as ranhuras distinto. Os autores avaliaram o desempenho das ferramentas em torneamento de ferro fundido cinzento e não observaram diferença na  $F_u$  entre as ferramentas com e sem textura. Stoeterau, Janssen e Mallmann (2017) texturizaram com laser de pulsos ultracurtos diferentes dimples (calotas esféricas) em ferramentas de metal duro. Ao torneiar ferro fundido nodular os autores não notaram diferença entre ferramentas com e sem textura nas diversas condições de corte avaliadas.

Figura 52 – MEV-EDS da superfície de saída de ferramentas após torneamento do FC250.  
(a) Referência  $f = 0,20$  mm/volta; (b) Texturizada  $f = 0,20$  mm/volta; (c) Referência  $f = 0,25$  mm/volta;  
(d) Texturizada  $f = 0,25$  mm/volta



Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados da Figura 52 (d) sugerem, que para avanços maiores do que 0,25 mm/volta a  $F_u$  para ferramenta texturizada pode igualar ou ser inferior à de

referência. Do mesmo modo, resultados de  $F_u$  favoráveis à ferramenta texturizada podem ser encontrados aproximando mais a textura da aresta de corte. Todavia, é importante citar que o ferro fundido cinzento é um material frágil (campo plástico limitado) para a ocorrência de deformação plástica e aderência de material da peça dentro das texturas. Além disso, as condições e geometria do corte podem ser fatores determinantes para o sucesso da aplicação da textura.

Em média a ferramenta de referência proporcionou  $F_u$  de 780,416 N, enquanto a texturizada 821,842 N. Esta diferença se mostrou estatisticamente significativa.

### 5.2.2 Temperatura na usinagem do FC250

Na Tabela 11 tem-se os valores médios de Temperatura, principalmente do fluxo de cavaco, considerando a variação das ferramentas e dos avanços.

Tabela 11 – Valores médios de temperatura para FC250 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em °C

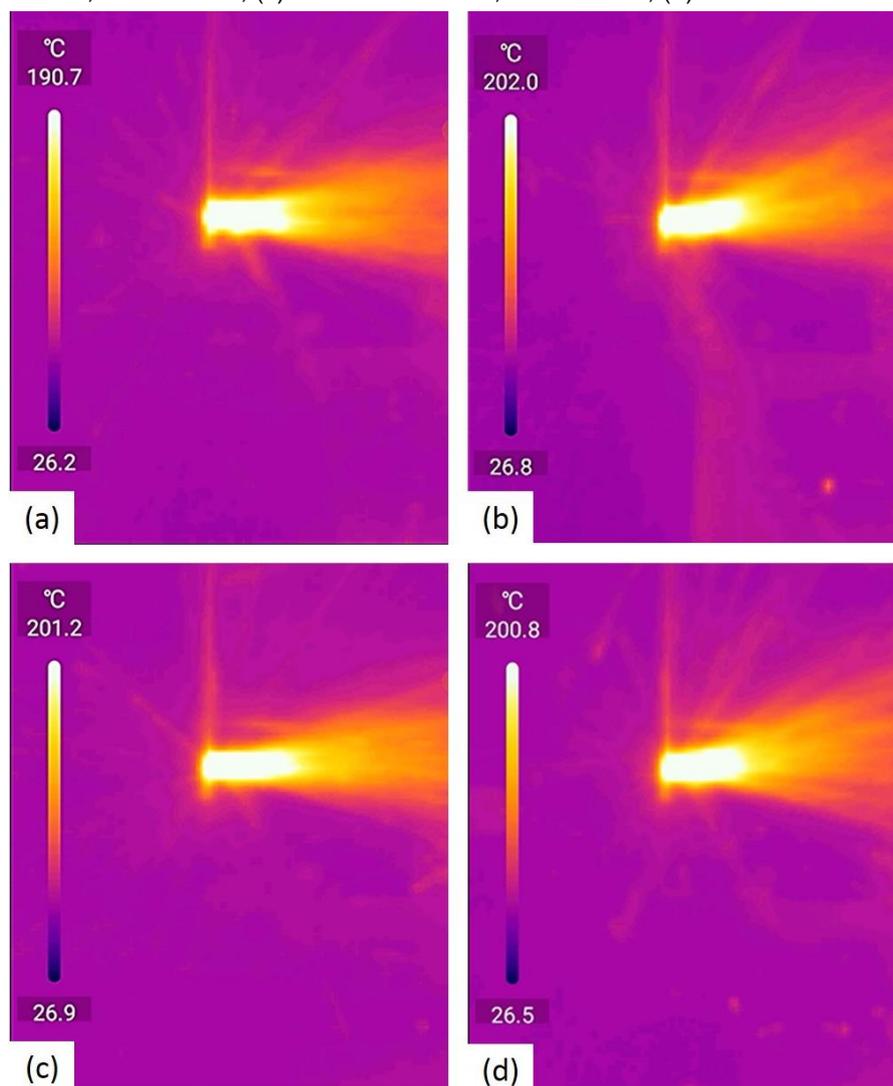
Referência		Texturizada	
f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta
190,8	202,0	201,2	200,9

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 53 tem-se imagens ilustrativas, capturadas com a câmera térmica, posicionada sobre a superfície de saída das ferramentas, em condições de temperatura próxima a dos valores médios tabelados.

Na Tabela 12 tem-se a análise de variância para os valores máximos de temperatura. O nível de significância estatística ( $\alpha$ ) para o teste de hipótese foi de 5% (0,05) utilizando a distribuição de Fisher (F).

Figura 53 – Imagens termográficas ilustrativas do fluxo de cavaco. (a) Referência  $f = 0,20$  mm/volta; (b) Referência  $f = 0,25$  mm/volta; (c) Texturizada  $f = 0,20$  mm/volta; (d) Texturizada  $f = 0,25$  mm/volta



Fonte: Produção do próprio autor.

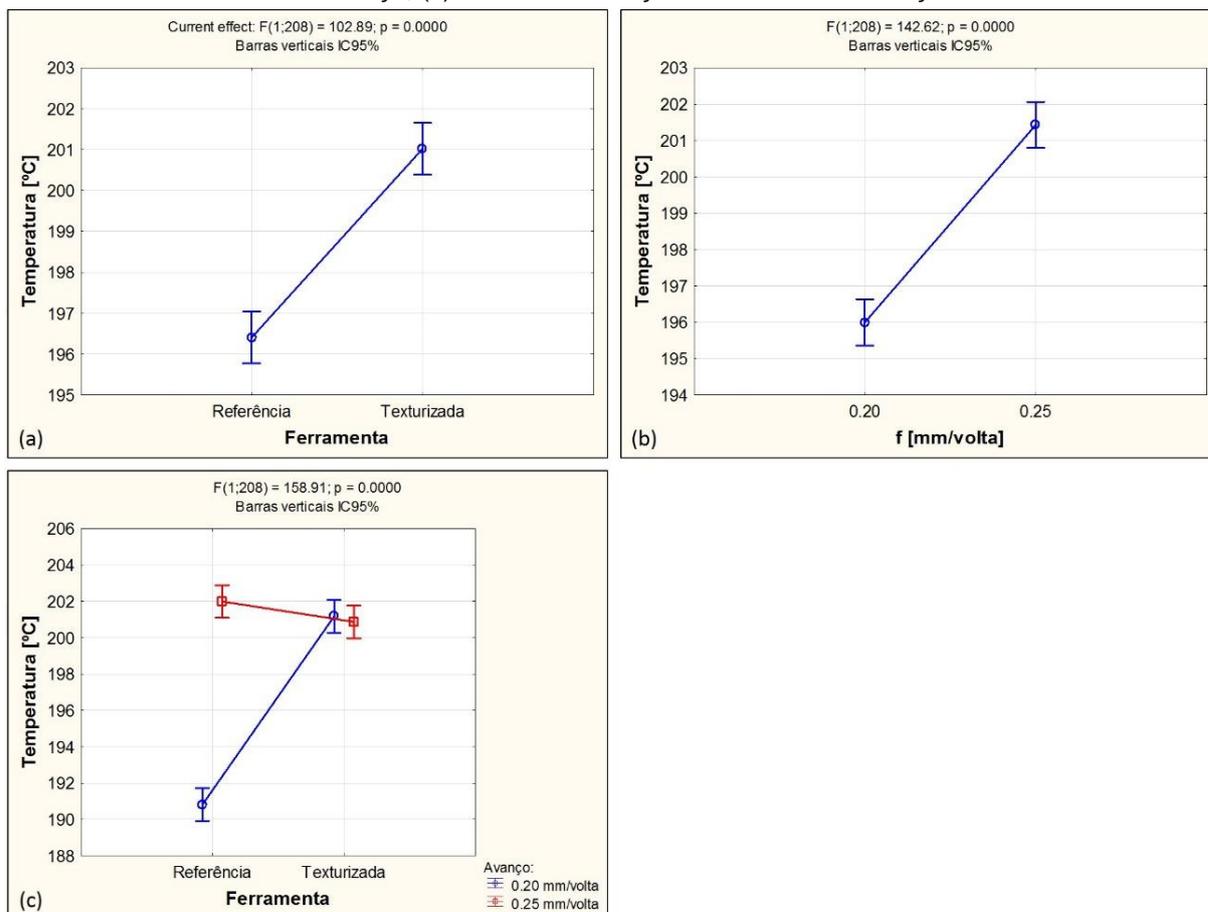
Tabela 12 – ANOVA para os resultados de temperatura no FC250

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
<b>Média</b>	8371311	1	8371311	762391,5	0,00000
<b>Ferramenta</b>	1130	1	1130	102,9	0,00000
<b>f</b>	1566	1	1566	142,6	0,00000
<b>Ferr. x f</b>	1745	1	1745	158,9	0,00000
<b>Erro</b>	2284	208	11		

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da Tabela 12, nota-se que tanto as variáveis principais (Ferramenta e  $f$ ), quanto a de interação (Ferr. x  $f$ ) são estatisticamente significativas ( $p < \alpha$ ). A interpretação dos resultados fica mais clara com o gráfico de efeitos, ver Figura 54.

Figura 54 – Gráfico de efeito para temperatura no FC250. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 54 (a) tem-se o efeito médio da variação da Ferramenta sobre a temperatura. Embora o efeito seja estatisticamente significativo, a diferença de temperatura entre as duas ferramentas é pequena de 4,6°C. A ferramenta texturizada proporcionou em média uma temperatura 2% maior do que a de referência. Na Figura 54 (b) nota-se que o aumento do avanço também proporcionou aumento médio na temperatura de aproximadamente 3% (5,4°C). Todavia, a avaliação do resultado é mais correta quando se analisa o gráfico de interação, Figura 54 (c), uma vez que ela foi significativa. Para o  $f = 0,20$  mm/volta observa-se que a temperatura foi 5% (10,4°C) maior para a ferramenta texturizada. Enquanto que para o  $f = 0,25$  mm/volta houve uma pequena redução de 0,6% (-1,1°C) a favor da ferramenta texturizada. Nota-se que a diferença de temperatura entre os diferentes avanços para a ferramenta texturizada é muito pequena (-0,3°C), enquanto que para a ferramenta de referência foi maior (11,2°C). Os resultados de temperatura estão concordando com os de força de usinagem. Na Figura 51 (c) também se observou que o efeito do avanço para a

ferramenta texturizada foi menor do que na referência. Os resultados sugerem que se a textura se aproximar um pouco mais da aresta principal de corte, o resultado de temperatura para o  $f = 0,20$  mm/volta pode ser menor, assim como a força de usinagem.

Xie et al. (2013) texturizaram ferramentas de metal duro com disco diamantado e observaram maior redução da temperatura de corte em ranhuras com profundidade de  $25 \mu\text{m}$  ao tornear Ti-6Al-4V. Youqiang et al. (2014) texturizaram a superfície de saída de ferramentas cerâmicas de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  com laser de nanossegundos e femtossegundos. Eles obtiveram ranhuras com profundidade em torno de  $45 \mu\text{m}$  e observaram redução na temperatura de corte em comparação com a ferramenta convencional ao tornear aço AISI 1045 endurecido.

Finalmente, não se observou nos registros de vídeo qualquer alteração na formação dos cavacos de FC250 fazendo uso ou não de ferramenta texturizada.

### 5.2.3 Rugosidade no FC250

Na Tabela 13 tem-se os dados de Rugosidade para o parâmetro de rugosidade média ( $R_a$ ) para Teste e Réplicas de 1 a 3, considerando a variação da ferramenta de corte e do avanço.

Tabela 13 – Dados de  $R_a$  para FC250 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em  $\mu\text{m}$

	Referência		Texturizada	
	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta
T	1,655	2,497	1,705	2,689
R1	1,659	2,396	1,656	2,439
R2	1,654	2,152	1,564	2,433
R3	1,619	2,326	1,666	2,403
<b>Médias</b>	1,647	2,343	1,705	2,491

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 14 tem-se a análise de variância para os dados de rugosidade  $R_a$ . O nível de significância estatística ( $\alpha$ ) para o teste de hipótese foi de 5% (0,05) utilizando a distribuição de Fisher (F).

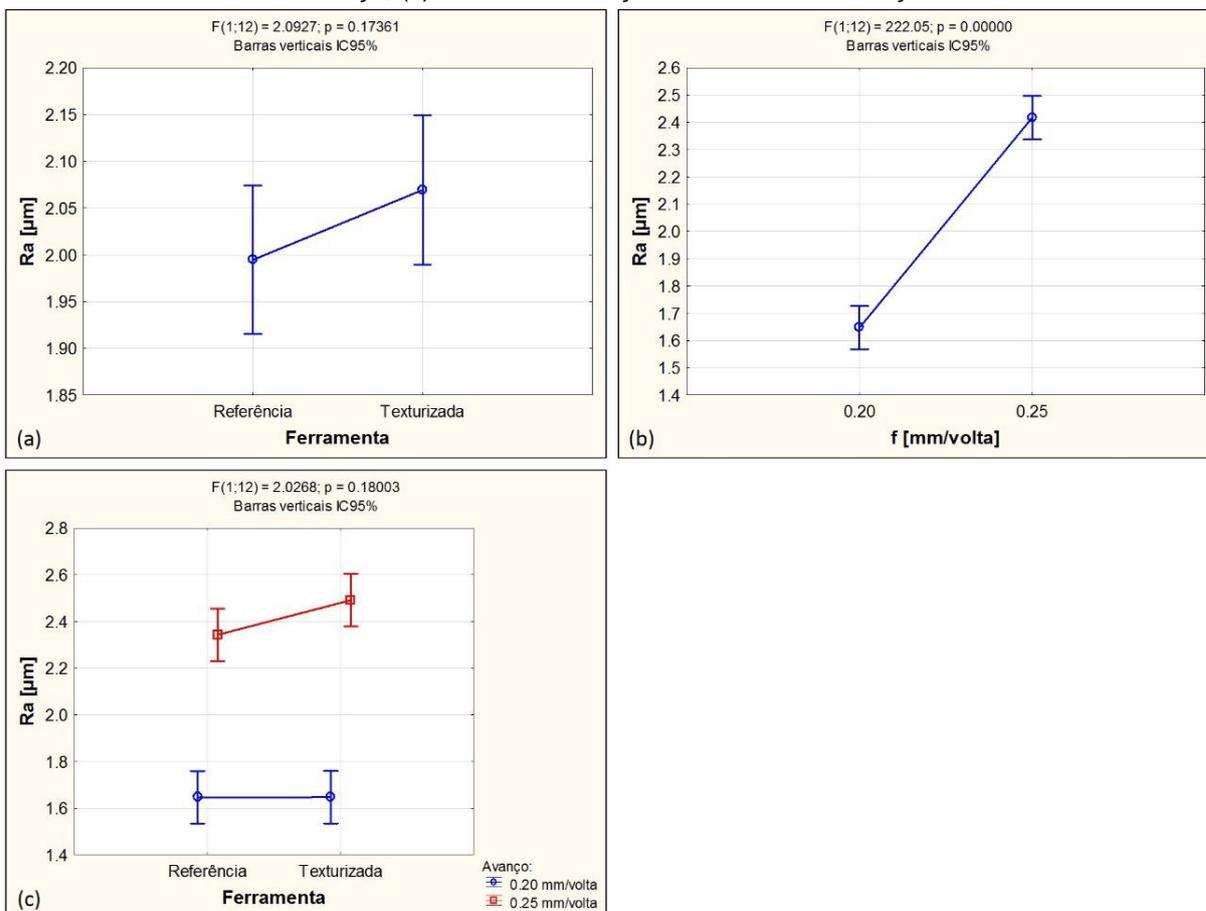
Tabela 14 – ANOVA para os resultados de Ra no FC250.

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
<b>Média</b>	66,06337	1	66,06337	6190,961	0,000000
<b>Ferramenta</b>	0,02233	1	0,02233	2,093	0,173612
<b>f</b>	2,36948	1	2,36948	222,050	0,000000
<b>Ferr. x f</b>	0,02163	1	0,02163	2,027	0,180028
<b>Erro</b>	0,12805	12	0,01067		

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da Tabela 14 compreende-se que a variável  $f$  (avanço) é significativa ( $p < \alpha$ ). O resultado era esperado, uma vez que o  $f$  tem influência geométrica na distância entre picos e vales que compõe a rugosidade da superfície (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Por outro lado, as variáveis Ferramenta e interação (Ferr. x  $f$ ) não se mostraram significativas estatisticamente ( $p > \alpha$ ). Os resultados ficam mais claros a partir da análise dos gráficos de efeito, ver Figura 55.

Figura 55 – Gráfico de efeito para Ra no FC250. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 55 (a) tem-se a influência da variação da Ferramenta sobre o parâmetro de rugosidade Ra. Nota-se que a ferramenta texturizada proporcionou valores de Ra em média 4% maiores (0,074  $\mu\text{m}$ ) do que a ferramenta de referência, todavia essa diferença não é estatisticamente significativa. Na Figura 55 (b) tem-se a influência do avanço (f). O aumento do f proporcionou um aumento médio nos valores de Ra de 0,770  $\mu\text{m}$  ou aproximadamente 47%. Como citado anteriormente e observado na equação teórica para torneamento cilíndrico externo,  $Ra = f^2/31,2r_\epsilon$ , sendo  $r_\epsilon$  o raio de ponta da ferramenta, o aumento do avanço tende a promover o aumento dos valores de rugosidade média. Na Figura 55 (c) tem-se a interação Ferr x f. Nota-se que para o f = 0,20 mm/volta as ferramentas proporcionaram valores de Ra iguais. Quando o f foi de 0,25 mm/volta a ferramenta texturizada gerou valor de Ra em média 6% maior (0,148  $\mu\text{m}$ ). Todavia, essa diferença não foi estatisticamente significativa.

Na Tabela 15 tem-se os dados de Rugosidade para o parâmetro (Rz) para Teste e Réplicas de 1 a 3, considerando a variação da ferramenta de corte e do avanço.

Tabela 15 – Dados de Rz para FC250 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em  $\mu\text{m}$

	Referência		Texturizada	
	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta
T	7,337	11,088	7,984	11,098
R1	7,598	11,206	7,892	10,757
R2	7,182	10,443	8,020	9,993
R3	7,581	10,257	7,642	10,409
<b>Médias</b>	7,424	10,748	7,885	10,564

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 16 tem-se a análise de variância para os dados de rugosidade Rz. O nível de significância estatística ( $\alpha$ ) para o teste de hipótese foi de 5% (0,05).

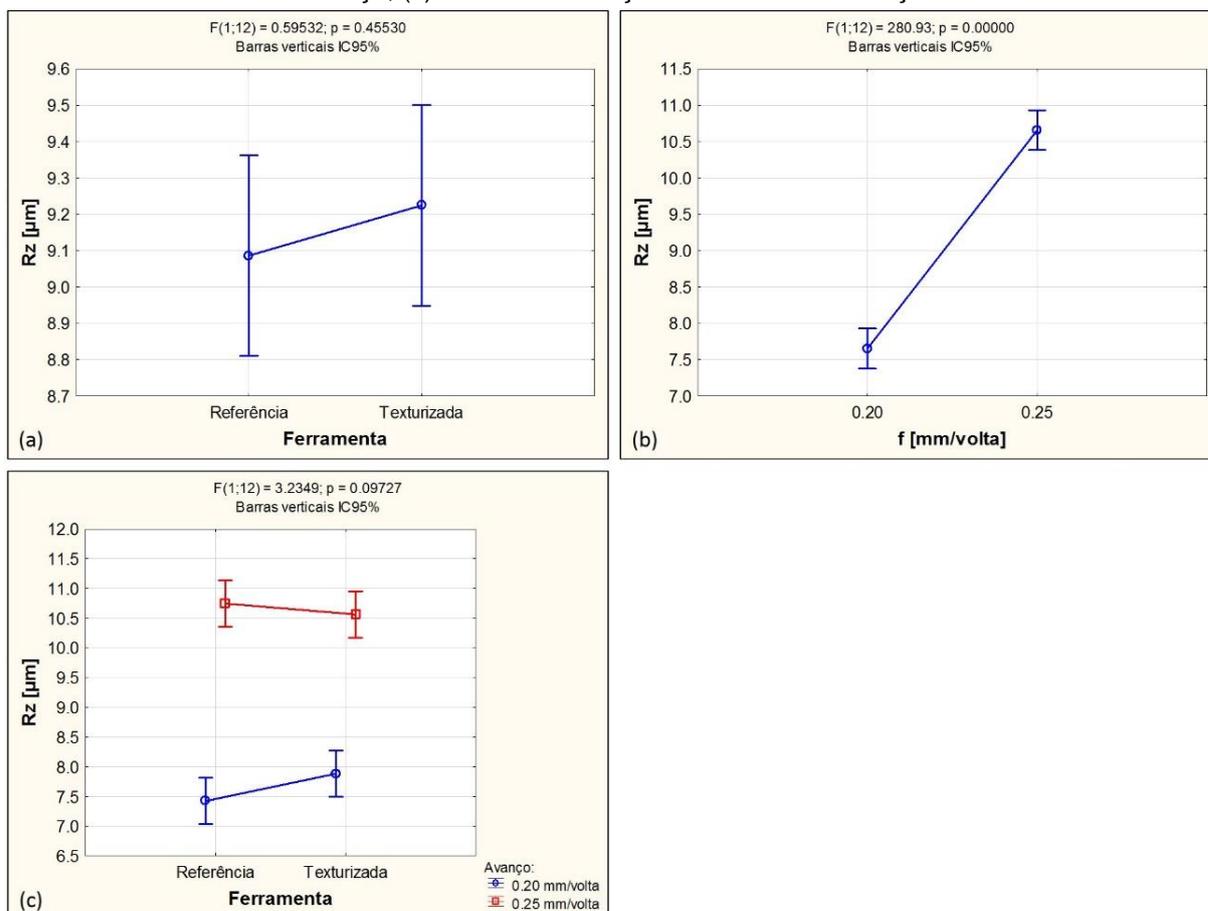
A partir da Tabela 16 tem-se novamente que a variável f influencia estatisticamente ( $p < \alpha$ ) a resposta. No entanto, para as variáveis Ferramenta e interação (Ferr. x f) não foram observadas diferença estatística. Os resultados ficam mais claros a partir da análise dos gráficos de efeito, ver Figura 56.

Tabela 16 – ANOVA para os resultados de Rz no FC250

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
<b>Média</b>	<b>1341,107</b>	<b>1</b>	<b>1341,107</b>	<b>10452,32</b>	<b>0,000000</b>
<b>Ferramenta</b>	0,076	1	0,076	0,60	0,455297
<b>f</b>	<b>36,045</b>	<b>1</b>	<b>36,045</b>	<b>280,93</b>	<b>0,000000</b>
<b>Ferr. x f</b>	0,415	1	0,415	3,23	0,097268
<b>Erro</b>	1,540	12	0,128		

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 56 – Gráfico de efeito para Rz no FC250. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 56 (a) tem-se que a ferramenta texturizada proporcionou valores médios de Rz ligeiramente maiores 1,5% (0,138 µm) do que a ferramenta de referência, de modo que esta diferença não é estatisticamente significativa. Na Figura 56 (b) nota-se que o aumento do f proporcionou um aumento médio nos valores de rugosidade de 39% (3,002 µm). Na Figura 56 (c) tem-se a interação Ferr x f, em que se nota para o f = 0,20 mm/volta que a ferramenta texturizada gerou valores de Rz maiores 6% (0,461 µm) que a de referência. Enquanto que para f = 0,25 mm/volta a

ferramenta texturizada proporcionou valores de Rz em média 2% menores (0,184  $\mu\text{m}$ ). Todavia, a interação não foi estatisticamente significativa.

Logo, as ferramentas tiveram um comportamento semelhante no torneamento do FC250 quanto aos parâmetros de rugosidade Ra e Rz avaliados. Referência valores médios de Ra = 1,995  $\mu\text{m}$  e Rz = 9,086  $\mu\text{m}$ , texturizada Ra = 2,069  $\mu\text{m}$  e Rz = 9,224  $\mu\text{m}$ .

#### 5.2.4 Circularidade no FC250

Na Tabela 17 tem-se os dados de Circularidade para Réplicas de 2 e 3, considerando a variação da ferramenta de corte e do avanço.

Tabela 17 – Dados de circularidade para FC250 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em  $\mu\text{m}$

	Referência		Texturizada	
	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta
R2	5,908	5,076	7,754	6,350
R2	6,340	4,498	5,328	5,316
R2	5,555	4,205	7,195	4,413
R2	5,971	4,230	5,207	4,540
R2	5,961	4,111	9,303	4,551
R3	7,213	3,884	5,121	3,551
R3	7,786	3,487	7,222	3,990
R3	4,735	5,859	4,747	3,969
R3	6,966	3,039	4,920	3,613
R3	7,756	4,240	6,175	3,708
<b>Médias</b>	6,419	4,263	6,297	4,400

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 18 tem-se a análise de variância para os dados de circularidade. O nível de significância estatística ( $\alpha$ ) utilizado foi de 5% (0,05).

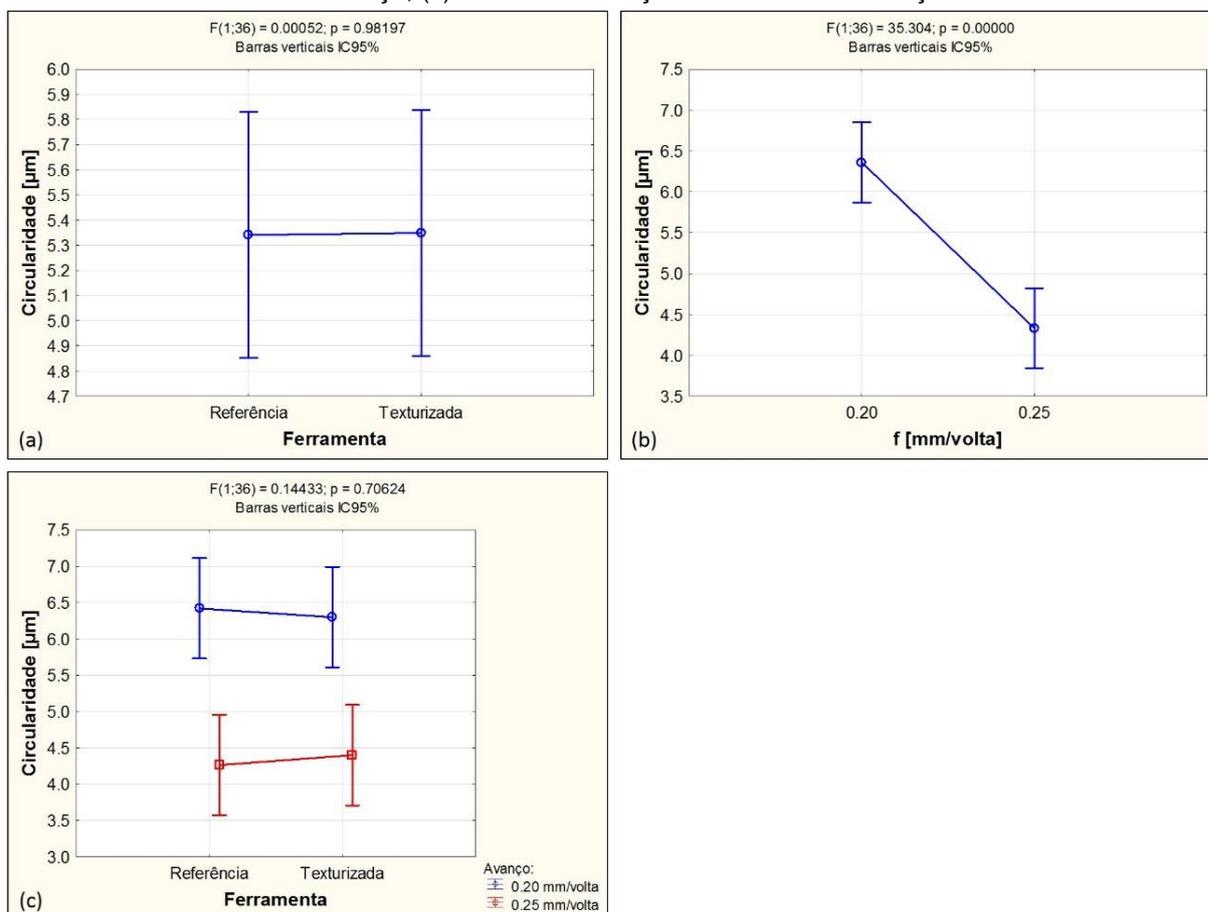
Tabela 18 – ANOVA para os resultados de circularidade no FC250

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
<b>Média</b>	1142,713	1	1142,713	982,1796	0,000000
<b>Ferramenta</b>	0,001	1	0,001	0,0005	0,981967
<b>f</b>	41,074	1	41,074	35,3035	0,000001
<b>Ferr. x f</b>	0,168	1	0,168	0,1443	0,706243
<b>Erro</b>	41,884	36	1,163		

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da Tabela 18 nota-se que apenas a variável f influenciou estatisticamente ( $p < \alpha$ ) a resposta. Os resultados ficam mais claros a partir da análise dos gráficos de efeito, ver Figura 57.

Figura 57 – Gráfico de efeito para circularidade no FC250. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 57 (a) tem-se que os valores médios de circularidade obtidos a partir das ferramentas de corte referência e texturizada foram similares, 5,341 e 5,349  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Na Figura 57 (b), o aumento da variável f possibilitou uma

redução estatisticamente significativa no desvio de circularidade de 32% (2,027  $\mu\text{m}$ ). Na Figura 57 (c), embora a interação Ferr. x f não seja significativa, para o f = 0,20 mm/volta com a ferramenta texturizada obteve-se uma ligeira redução na circularidade de 2% (0,122  $\mu\text{m}$ ), enquanto que para o f = 0,25 mm/volta ocorreu um pequeno aumento de 3% (0,137  $\mu\text{m}$ ).

### 5.3 RESULTADOS DE USINAGEM NO VSM13

Neste item descreve-se os resultados de força de usinagem, grau de recalque, rugosidade e circularidade no torneamento do VSN13 com as ferramentas avaliadas.

#### 5.3.1 Força de usinagem no VSM13

Na Tabela 19 é apresentado os dados de Força de usinagem ( $F_u$ ) durante o torneamento do aço inoxidável martensítico (VSM13), considerando apenas réplicas R2 e R3, variação da ferramenta e avanço.

Tabela 19 – Dados de  $F_u$  para VSM13 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em N

	Referência		Texturizada	
	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta
T	—	—	—	—
R1	—	—	—	—
R2	1083,676	1282,604	1082,274	1235,962
R3	1054,504	1246,465	1129,952	1248,352
<b>Médias</b>	1069,090	1264,535	1106,113	1242,157

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 20 tem-se a análise de variância para os dados de  $F_u$ , sabendo que o nível de significância estatística ( $\alpha$ ) para o teste de hipótese foi de 5% (0,05).

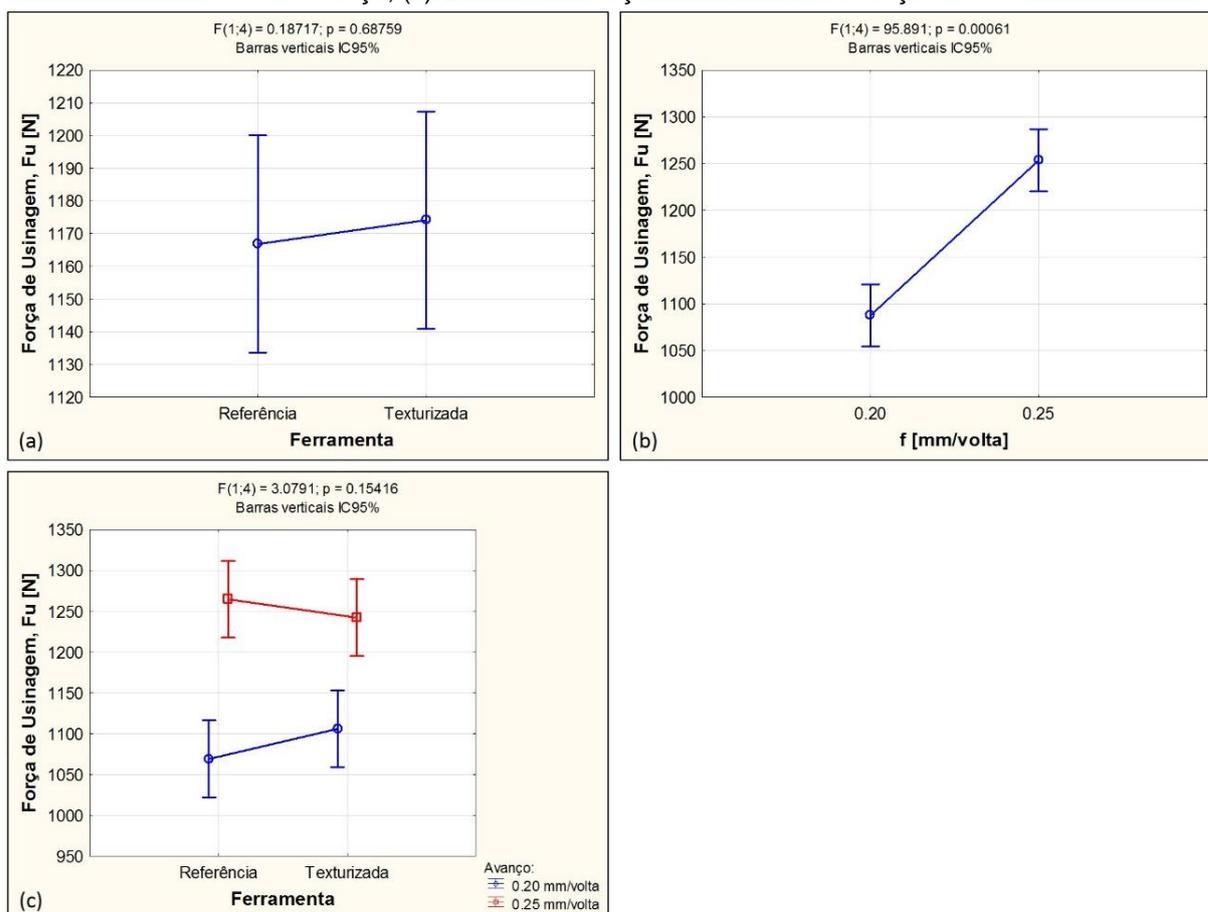
Tabela 20 – ANOVA para os resultados de Fu no VSM13

Efeito	SQ	G,L	QM	F	p
<b>Média</b>	10960066	1	10960066	19128,52	0,000000
<b>Ferramenta</b>	107	1	107	0,19	0,687587
<b>f</b>	54942	1	54942	95,89	0,000610
<b>Ferr. x f</b>	1764	1	1764	3,08	0,154162
<b>Erro</b>	2292	4	573		

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da Tabela 20 nota-se que existe diferença estatística significativa para a varável Avanço (f), como esperado. No entanto, o mesmo não se observa para as variáveis Ferramenta e interação Ferr. x f. A análise dos resultados fica mais clara a partir da análise dos gráficos de efeito, ver Figura 58.

Figura 58 – Gráfico de efeito para Fu no VSM13. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 58 (a) tem-se um aumento médio nos valores de Fu de 0,6% (7 N) ao mudar da ferramenta de referência para a texturizada. Como citado na Tabela 20,

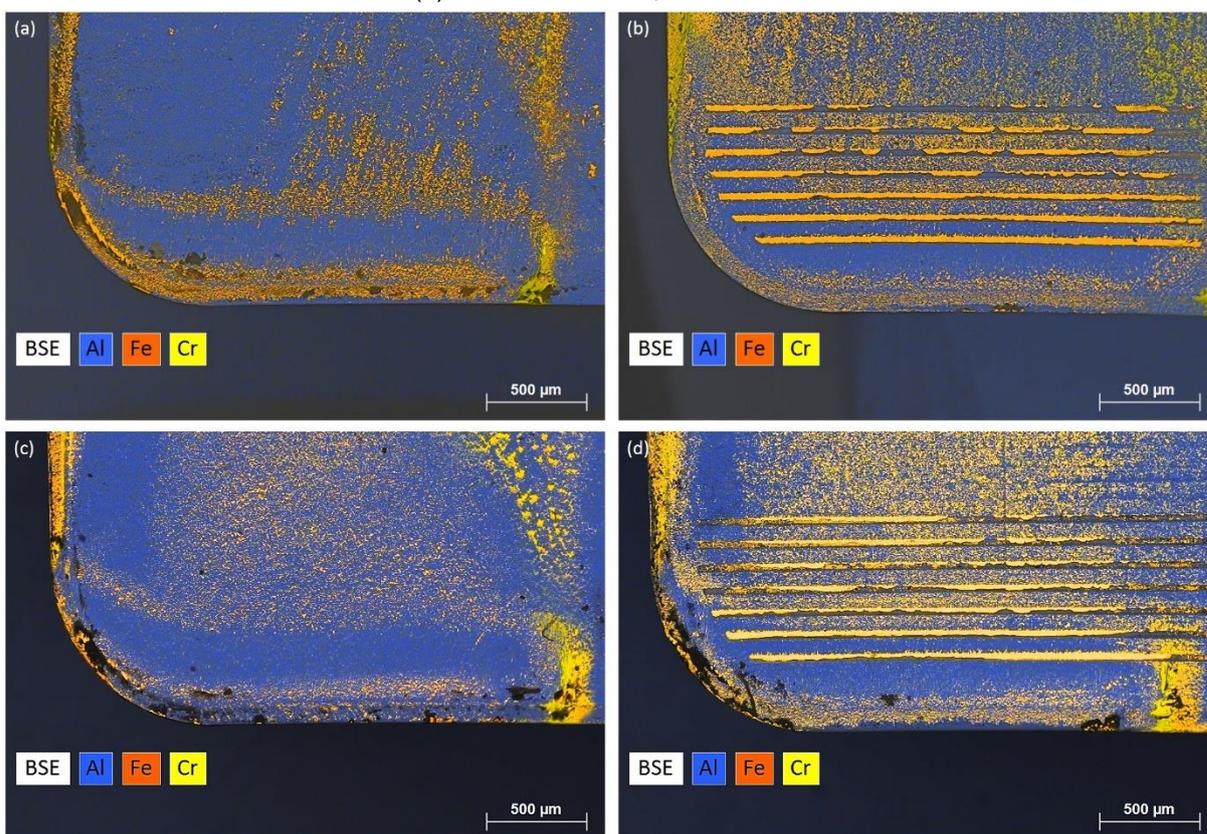
esse efeito não é estatisticamente significativo. Na Figura 58 (b) o aumento do  $f$  faz com que as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário aumentem, tendo como consequência o aumento da  $F_u$  (MACHADO et al., 2015). Com isso a  $F_u$  aumentou 15% (166 N) de 0,20 para 0,25 mm/volta. Na Figura 58 (c) tem-se o gráfico de efeito para a interação Ferr. x  $f$ . Nota-se que para  $f = 0,20$  mm/volta a  $F_u$  aumentou 3% (37 N) da ferramenta de referência para a texturizada. Para o  $f = 0,25$  mm/volta houve uma diminuição no valor de  $F_u$  de 2% (22 N) da ferramenta de referência para a texturizada. Isso se deve a uma força corte 5% menor para a ferramenta texturizada. Para a ferramenta de referência ao variar o avanço houve um aumento na  $F_u$  de 18% (195 N). Enquanto para a ferramenta texturizada o aumento foi de 12% (136 N). Embora a interação não seja estatisticamente significativa, o comportamento dos resultados para o VSM13 se assemelha aos do FC250. Para o ferro fundido utilizando ferramenta de referência, o aumento do  $f$  proporcionou um pequeno aumento na  $F_u$  (4%), enquanto que fazendo uso da ferramenta texturizada o aumento foi próximo de 0%. Os resultados sugerem que a textura pode influenciar na interface cavaco-ferramenta diminuindo  $F_u$ , mas isso dependerá do material da peça, provavelmente do material da ferramenta, da distância da textura em relação a aresta principal de corte, da orientação da textura em relação à movimentação do cavaco e dos próprios aspectos dimensionais da textura. Portanto, acredita-se que a texturização em ferramenta cerâmica possa gerar resultado mais favorável se as ranhuras estiverem mais próximas da aresta principal de corte.

Na Figura 59 tem-se imagens em MEV com mapa químico por EDS da superfície de saída para as ferramentas de referência e texturizada para os avanços ( $f$ ) de 0,20 e 0,25 mm/volta. É difícil relacionar área de contato cavaco-ferramenta e  $F_u$  para um mesmo avanço, quando se compara ferramenta de referência e texturizada, porque a interface cavaco-ferramenta é diferente como pode ser notado nas Figuras 59 (a) e (b). Para a ferramenta de referência, Figura 59 (a), tem-se uma região próxima à aresta principal que sugere ser uma região de aderência, seguida de uma região com pouco vestígio de material aderido (escorregamento), e finalmente, presença de marcas de escorregamento (stick-slip) que se estende um pouco mais sobre a superfície de saída. Na Figura 59 (b) tem-se vestígio de material aderido sobre a aresta de corte, seguido de uma área de escorregamento (sem presença de material aderido), depois ranhuras preenchidas com o material da peça intercaladas, todavia com pouca aderência de material sobre as cristas das ranhuras. A partir das Figuras

59 (c) e 59 (d) observa-se uma área de contato um pouco maior, devido ao maior  $f$  (0,25 mm/volta), em comparação às Figuras 59 (a) e 59 (b). Assim como foi detectado na Figura 59 (c), material da peça aderido sobre a superfície de saída da ferramenta também ocorreu na ferramenta texturizada, Figura 59 (d), com material preenchendo as últimas texturas. Isto sugere o efeito de entupimento das ranhuras (clogging effect) com influência na  $F_u$ . Espera-se que esse efeito seja maior se a textura estiver mais próxima da aresta de corte para o dado par ferramenta-peça.

Os resultados  $F_u$  poderiam ainda ser mais favoráveis a ferramenta texturizada se todos os dados (T a R3) fossem considerados, uma redução de 5% (62 N) no maior avanço.

Figura 59 – MEV-EDS da superfície de saída de ferramentas após torneamento do VSM13. (a) Referência  $f = 0,20$  mm/volta; (b) Texturizada  $f = 0,20$  mm/volta; (c) Referência  $f = 0,25$  mm/volta; (d) Texturizada  $f = 0,25$  mm/volta



Fonte: Produção do próprio autor.

Bertolete et al, 2018 texturizou ferramentas de metal duro com lasers de pulso ultracurto. Os autores fizeram ensaio de força por meio de torneamento de aço inoxidável martensítico (VSM13). Foi observado uma redução de cerca de 21% na força de usinagem e 9% na redução de potência de corte para o melhor modelo de

textura. Acredita-se que esta redução na Fu tenha sido consequência da aderência de material da peça sobre a superfície de saída (clogging effect).

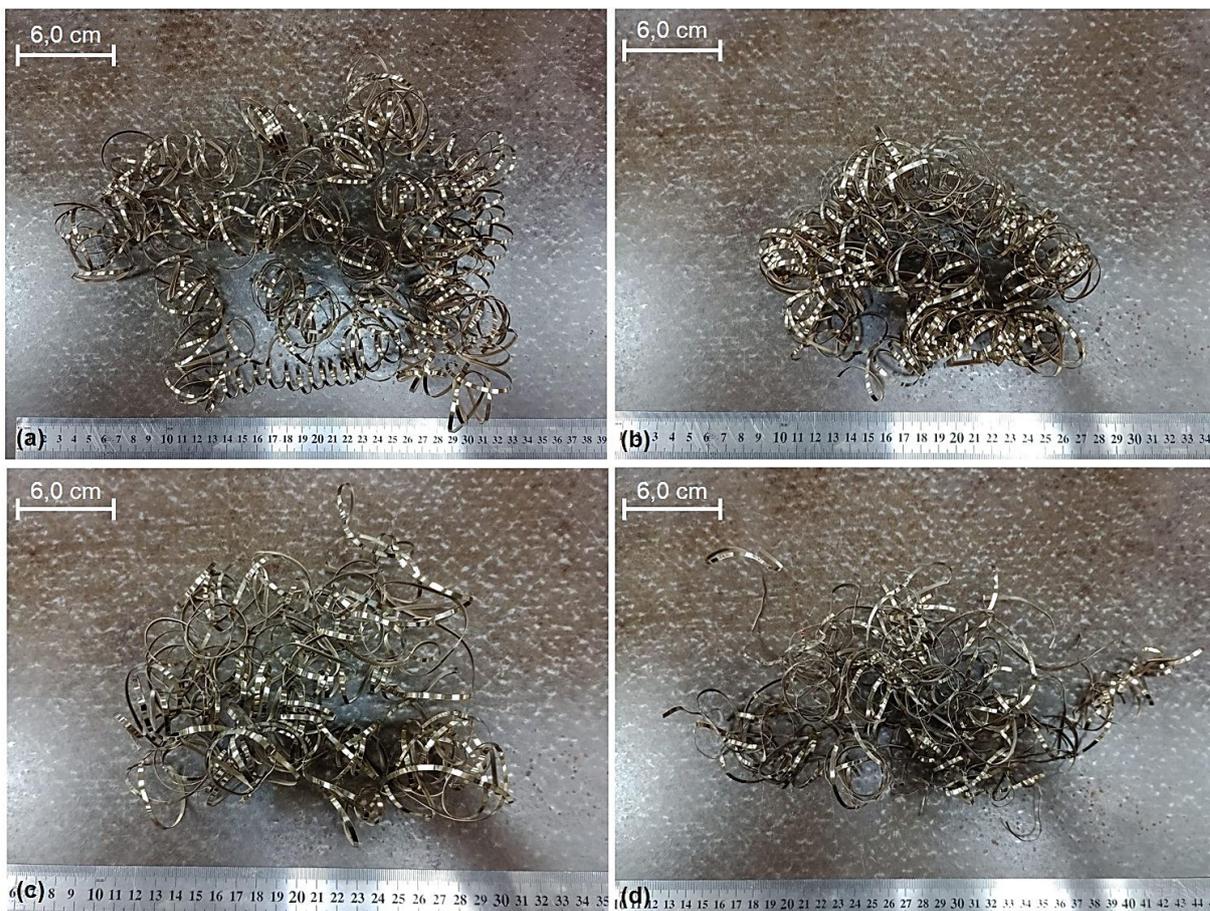
Youqiang et al. (2013) sugere que exista uma condição ideal para fabricação das texturas para maximizar o efeito de *clogging effect*, e que está diretamente ligado com a distância da aresta de corte principal até a superfície de saída da ferramenta, onde se inicia a primeira textura.

Em resumo, as ferramentas avaliadas apresentaram valores médios de Fu estatisticamente iguais, referência 1166,812 N e texturizada 1174,135 N.

### **5.3.2 Grau de recalque no VSM13**

O aço inoxidável martensítico VSM13 gera um tipo de cavaco segmentado. O mesmo apresentou forma de fita, predominantemente emaranhado, independentemente da ferramenta ou do avanço. Nos vídeos gravados da formação do cavaco não se identificou diferença na formação fazendo uso ou não de ferramenta texturizada. Na Figura 60 tem-se imagens dos cavacos formados para as diferentes condições avaliadas.

Figura 60 – Cavaco do aço inoxidável martensítico (VSM13) com forma predominante emaranhado. (a) Referência  $f = 0,20$  mm/volta; (b) Texturizada  $f = 0,20$  mm/volta; (c) Referência  $f = 0,25$  mm/volta; (d) Texturizada  $f = 0,25$  mm/volta



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 21 tem-se os dados de Grau de recalque ( $R_c$ ) para Réplicas de 2 e 3, considerando a variação da ferramenta de corte e do avanço.

Tabela 21 – Dados de grau de recalque para VSM13 considerando a variação da ferramenta e avanço

	Referência		Texturizada	
	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta
R2	0,317	0,409	0,316	0,397
R2	0,321	0,394	0,317	0,403
R2	0,335	0,383	0,311	0,407
R2	0,337	0,393	0,309	0,399
R3	0,332	0,393	0,325	0,391
R3	0,334	0,392	0,322	0,398
R3	0,339	0,401	0,335	0,382
R3	0,344	0,396	0,331	0,390
<b>Médias</b>	0,332	0,395	0,321	0,396

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 22 tem-se a análise de variância para os dados de Rc para o nível de significância estatística ( $\alpha$ ) de 5% (0,05).

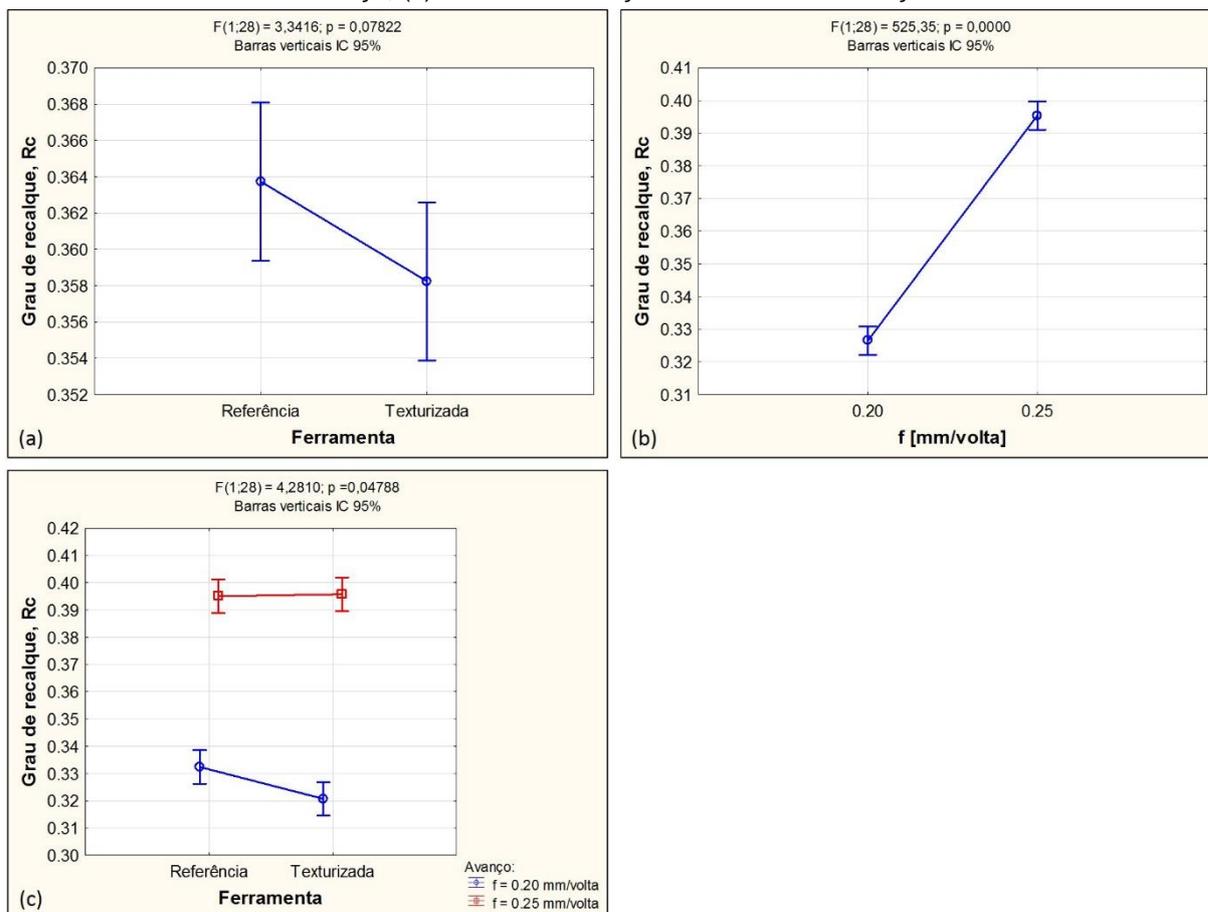
Tabela 22 – ANOVA para os resultados de Rc no VSM13

<b>Efeito</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>Média</b>	4,169916	1	4,169916	57711,64	0,000000
<b>Ferramenta</b>	0,000241	1	0,000241	3,34	0,078222
<b>f</b>	0,037958	1	0,037958	525,35	0,000000
<b>Ferr. x f</b>	0,000309	1	0,000309	4,28	0,047884
<b>Erro</b>	0,002023	28	0,000072		

Fonte: Produção do próprio autor.

Da Tabela 22 nota-se que as variáveis f e Ferr. x f influenciaram a resposta de maneira estatisticamente significativa, enquanto a variável Ferramenta, de maneira isolada, não. A análise dos resultados fica mais clara com gráficos de efeito, Figura 61.

Figura 61 – Gráfico de efeito para Rc no VSM13. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 61 (a) tem-se valores médios de Rc, quando se varia a ferramenta de corte. Embora a diferença não seja estatisticamente significativa, a ferramenta texturizada proporcionou uma pequena redução média no valor Rc de 1,5% (0,006). Essa diminuição no Rc pode estar relacionada ao efeito de entupimento das ranhuras influenciando na interface cavaco-ferramenta, porém os resultados ainda não permitem correlacionar com a  $F_u$ . Alternativamente, pode ser uma simples dispersão dos resultados. Na Figura 61 (b), o aumento do f promoveu um aumento no valor médio de Rc de 21% (0,071), sugerindo maior deformação do cavaco com o aumento de f (TRENT; WRIGHT, 2000). Na Figura 61 (c) tem-se a interação Ferr. x f. Estatisticamente a diferença nos valores médios entre a ferramenta texturizada e de referência são significativos. Essa diferença se justifica para o  $f = 0,20$  mm/volta, em que a ferramenta texturizada possibilitou uma redução no valor de Rc de 3,5% (0,012). Para o  $f = 0,25$  mm/volta os valores Rc foram semelhantes 0,409 e 0,410 para as ferramentas de referência e texturizada, respectivamente.

### 5.3.3 Rugosidade no VSM13

Na Tabela 23 tem-se os dados de rugosidade (Ra) obtidos a partir do torneamento do aço inoxidável martensítico (VSM13), considerando apenas réplicas R2 e R3, variação da ferramenta e avanço.

Tabela 23 – Dados de Ra para VSM13 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em  $\mu\text{m}$ .

	Referência		Texturizada	
	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta
T	—	—	—	—
R1	—	—	—	—
R2	1,757	3,510	2,661	3,869
R3	1,696	3,016	2,023	2,844
<b>Médias</b>	1,727	3,263	2,342	3,356

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 24 tem-se a análise de variância para os dados de Ra, sabendo que o nível de significância estatística ( $\alpha$ ) para o teste de hipótese foi de 5% (0,05).

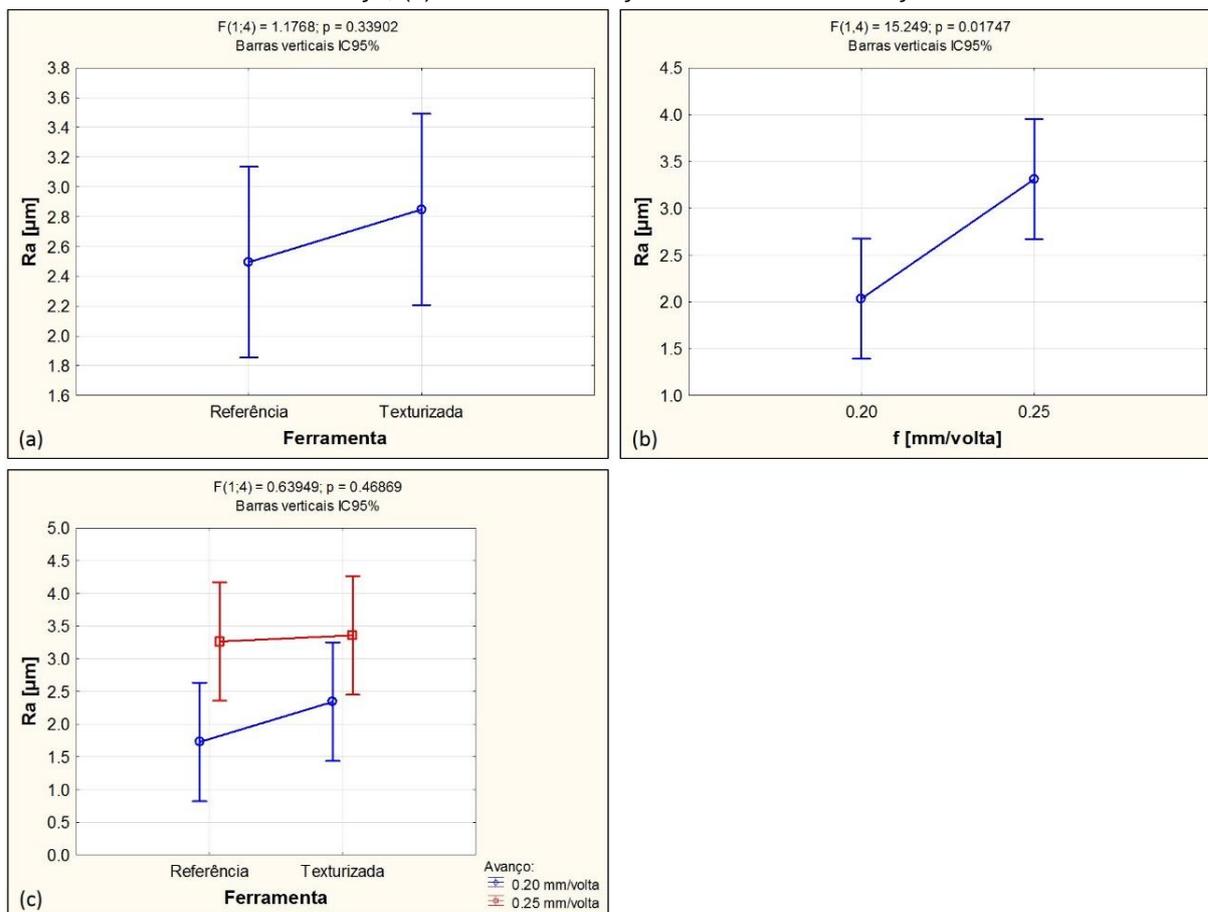
Tabela 24 – ANOVA para os resultados de Ra no VSM13

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
<b>Média</b>	57,11534	1	57,11534	267,7005	0,000082
<b>Ferramenta</b>	0,25107	1	0,25107	1,1768	0,339019
<b>f</b>	3,25348	1	3,25348	15,2491	0,017467
<b>Ferr. x f</b>	0,13644	1	0,13644	0,6395	0,468693
<b>Erro</b>	0,85342	4	0,21336		

Fonte: Produção do próprio autor.

Da Tabela 24 compreende-se que a variável f influencia significativamente a resposta, enquanto as variáveis Ferramenta e interação Ferr. x f não. A análise dos resultados fica mais clara a partir da Figura 62.

Figura 62 – Gráfico de efeito para Ra no VSM13. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 62 (a) tem-se um aumento médio nos valores de Ra de 14% (0,354  $\mu\text{m}$ ) ao utilizar a ferramenta texturizada. Como citado anteriormente, essa diferença entre ferramentas não é estatisticamente diferente. Por outro lado, ao aumentar o parâmetro de corte  $f$ , ver Figura 62 (b), houve um aumento no valor de Ra estatisticamente significativo de 63% (1,275  $\mu\text{m}$ ). O aumento do avanço tem influência geométrica na distância entre os picos e vales que compõe o perfil de rugosidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Finalmente, na Figura 62 (c) tem-se um aumento nos valores médios de Ra de 36% (0,616  $\mu\text{m}$ ) para  $f = 0,20$  mm/volta, ao mudar da ferramenta de referência para a texturizada. Enquanto que para o  $f = 0,25$  mm/volta, o aumento foi 3% (0,093  $\mu\text{m}$ ), ou seja, resultados semelhantes. Para a ferramenta de referência a alteração do  $f$  proporcionou uma diferença nos valores de Ra de 1,537  $\mu\text{m}$ , enquanto que para a ferramenta texturizada 1,014  $\mu\text{m}$ . A pequena diferença de rugosidade gerada pelas ferramentas indica que a interação não foi estatisticamente significativa, como citado na Tabela 24.

Na Tabela 25 tem-se os dados de rugosidade (Rz) para o aço inoxidável martensítico (VSM13), considerando as réplicas R2 e R3, variação da ferramenta e avanço.

Tabela 25 – Dados de Rz para VSM13 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em  $\mu\text{m}$

	Referência		Texturizada	
	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta
T	—	—	—	—
R1	—	—	—	—
R2	9,231	15,227	10,181	18,054
R3	8,108	14,125	9,133	13,453
<b>Médias</b>	8,669	14,676	9,657	15,754

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 26 tem-se a análise de variância para os dados de Rz, considerando nível de significância estatística ( $\alpha$ ) de 5% (0,05).

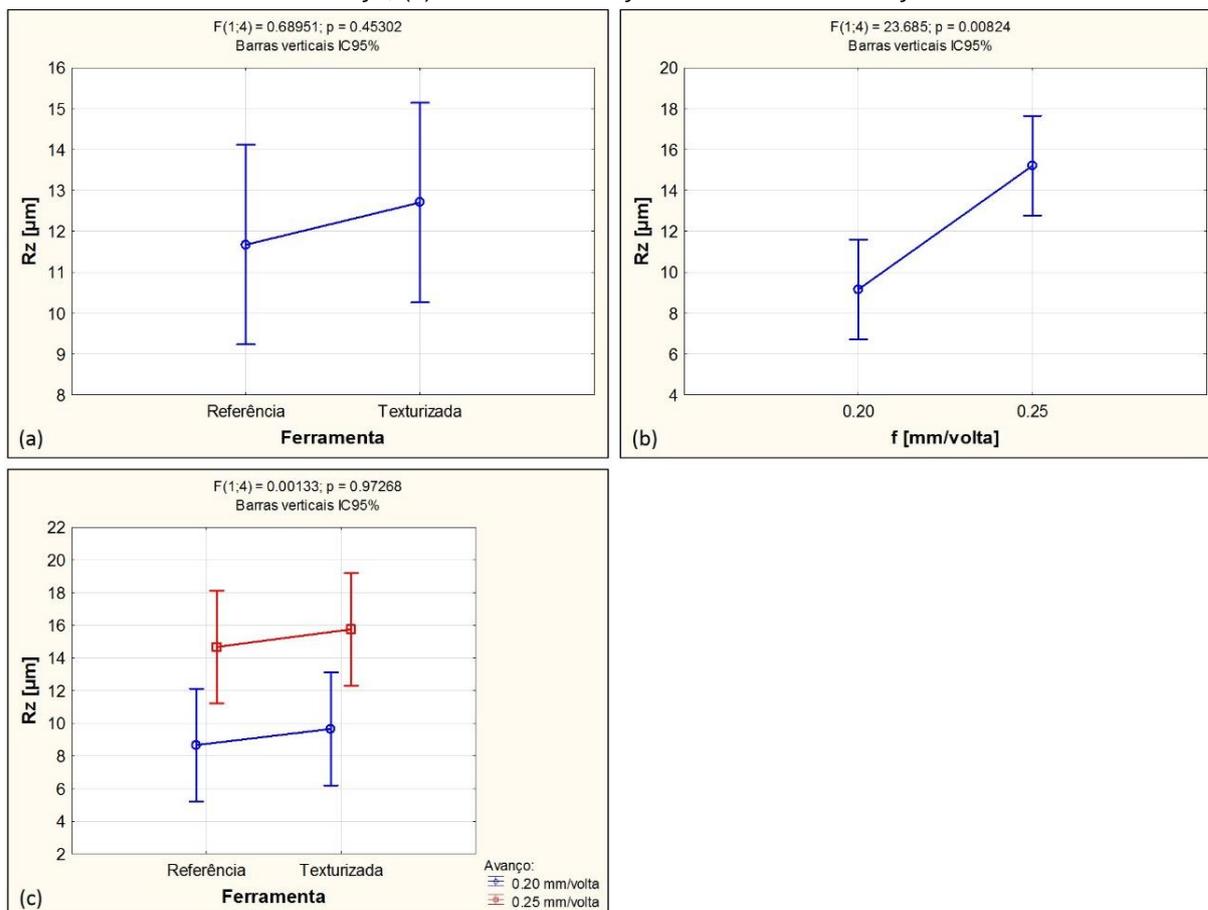
Tabela 26 – ANOVA para os resultados de Rz no VSM13

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
<b>Média</b>	1188,531	1	1188,531	384,3155	0,000040
<b>Ferramenta</b>	2,132	1	2,132	0,6895	0,453018
<b>f</b>	73,249	1	73,249	23,6853	0,008239
<b>Ferr. x f</b>	0,004	1	0,004	0,0013	0,972678
<b>Erro</b>	12,370	4	3,093		

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da Tabela 26 tem-se que a variável f influenciou significativamente os resultados de rugosidade Rz. Todavia, as variáveis Ferramenta e Ferr. x f não se mostraram estatisticamente significativas. Os resultados podem ser analisados com o auxílio da Figura 63.

Figura 63 – Gráfico de efeito para Ra no VSM13. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 63 (a) nota-se um aumento no valor médio de rugosidade parâmetro  $R_z$  de 9% (1,033  $\mu\text{m}$ ) com a ferramenta texturizada. Esse aumento não é estatisticamente significativo. Na Figura 63 (b) o aumento no  $f$  proporcionou um aumento estatisticamente significativo de 66% (6,052  $\mu\text{m}$ ) no valor médio de  $R_z$ . Ao avaliar a interação Ferramenta x  $f$ , Figura 63 (c) tem-se que para os avanços de 0,20 e 0,25 mm/volta a ferramenta texturizada proporcionou resultados de  $R_z$  ligeiramente maiores, 11% (0,987  $\mu\text{m}$ ) e 7% (1,078  $\mu\text{m}$ ), respectivamente. O aumento em  $R_z$  ao aumentar o  $f$  para a ferramenta de referência foi de 6,007  $\mu\text{m}$  (69%) e para a ferramenta texturizada foi 6,097  $\mu\text{m}$  (63%). Essa pequena diferença entre as ferramentas evidencia que a interação não é estatisticamente significativa.

Em resumo as ferramentas apresentaram resultados médios de rugosidade semelhantes: referência  $R_a = 2,495 \mu\text{m}$  e  $R_z = 11,673 \mu\text{m}$ , texturizada  $R_a = 2,849 \mu\text{m}$  e  $R_z = 12,705 \mu\text{m}$ .

### 5.3.4 Circularidade no VSM13

Na Tabela 27 tem-se os dados de Circularidade para Réplicas de 2 e 3, considerando a variação da ferramenta de corte e do avanço.

Tabela 27 – Dados de circularidade para VSM13 considerando a variação da ferramenta e avanço, unidade em  $\mu\text{m}$

	Referência		Texturizada	
	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta	f 0,20 mm/volta	f 0,25 mm/volta
R2	20,310	194,956	18,047	225,067
R2	27,294	223,758	23,468	240,230
R2	27,691	240,182	7,882	233,161
R2	33,184	259,073	9,061	243,935
R2	38,804	273,660	7,418	248,931
R3	17,762	130,345	10,503	106,153
R3	19,794	160,844	9,655	127,037
R3	17,401	167,538	12,271	140,960
R3	15,840	175,859	15,319	153,605
R3	19,665	177,547	16,094	169,007
<b>Médias</b>	23,775	200,376	12,972	188,809

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 28 tem-se a análise de variância para os dados de circularidade para o VSM13. O nível de significância estatística ( $\alpha$ ) utilizado foi de 5% (0,05).

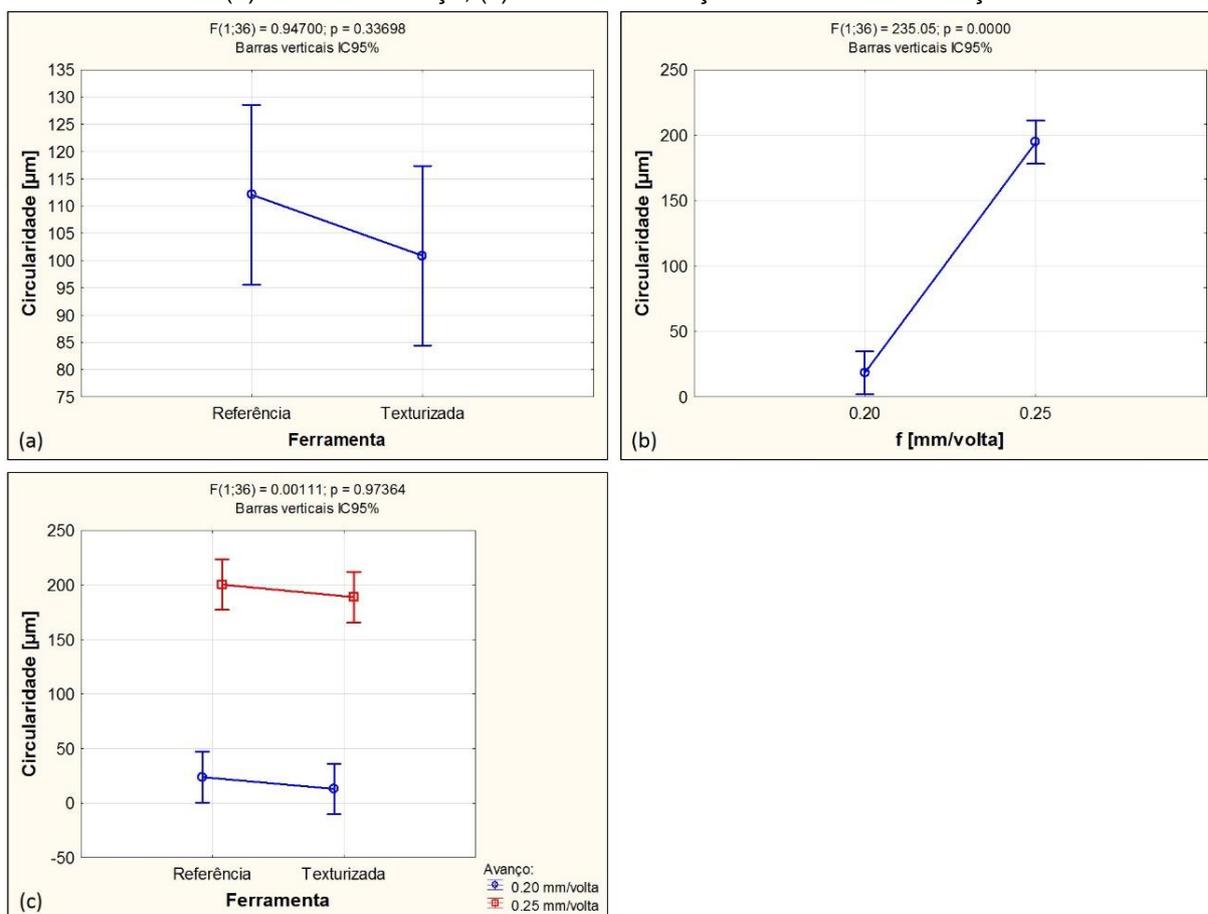
Tabela 28 – ANOVA para os resultados de circularidade no VSM13

Efeito	SQ	GL	QM	F	p
<b>Média</b>	453543,2	1	453543,2	343,3060	0,000000
<b>Ferramenta</b>	1251,1	1	1251,1	0,9470	0,336977
<b>f</b>	310532,0	1	310532,0	235,0548	0,000000
<b>Ferr. x f</b>	1,5	1	1,5	0,0011	0,973640
<b>Erro</b>	47559,8	36	1321,1		

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da Tabela 28 nota-se que apenas a variável f influenciou significativamente ( $p < \alpha$ ) a resposta. A análise dos resultados fica mais claro a partir dos gráficos de efeito, ver Figura 64.

Figura 64 – Gráfico de efeito para circularidade no VSM13. (a) Efeito da ferramenta de corte; (b) Efeito do avanço; (c) Efeito da interação Ferramenta x avanço



Fonte: Produção do próprio autor.

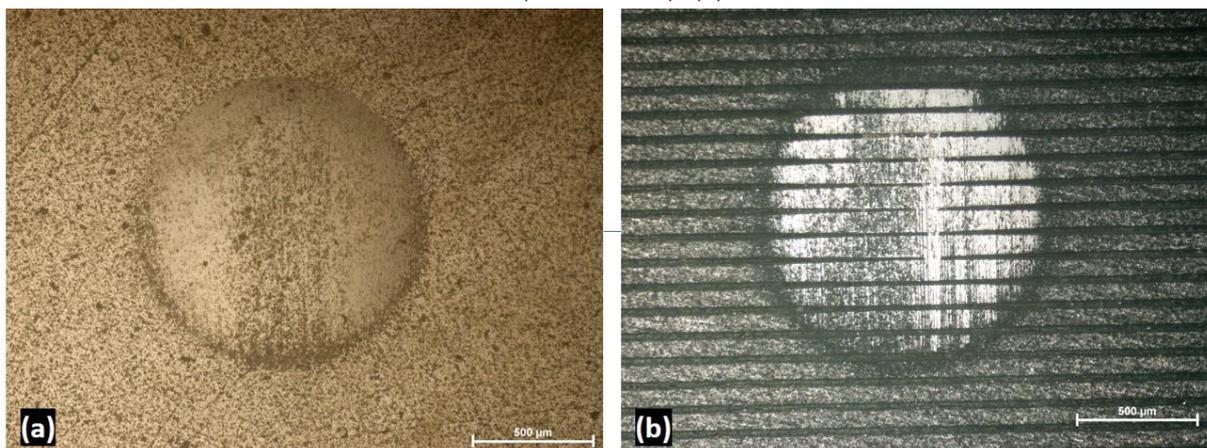
Na Figura 64 (a) tem-se o efeito da Ferramenta sobre a circularidade. Nota-se que a ferramenta texturizada proporcionou uma redução média nos valores da resposta de 10% (11,185 μm), embora a diferença não seja estatisticamente significativa. Na Figura 64 (b), o aumento da variável f proporcionou um aumento estatisticamente significativo no desvio de circularidade de 959% (176,219 μm). Esse resultado está relacionado à grande deformação que o aço inoxidável sofre durante a usinagem e as vibrações observadas no sistema peça-ferramenta-máquina no avanço de 0,25 mm/volta. Na Figura 64 (c), embora a interação Ferr. x f não seja significativa, para o f = 0,20 mm/volta a ferramenta texturizada proporcionou uma redução na circularidade de 45% (10,803 μm), enquanto que para o f = 0,25 mm/volta a redução foi de 6% (11,568 μm). Para ambos os avanços a ferramenta texturizada proporcionou uma diminuição nos desvios de circularidade. Este comportamento pode estar relacionado ao efeito que a textura causa na interface cavaco-ferramenta durante a

formação do cavaco. Nota-se que existe tendências semelhantes entre os gráficos de efeito para  $R_c$  (Figura 61) e para Circularidade.

#### 5.4 ENSAIO DE DESGASTE MICROABRASIVO

Na Figura 65 são mostradas imagens representativas de microscopia óptica (MO) das calotas de desgaste obtidas ao final da distância total de deslizamento (754,5 m) dos ensaios de microabrasão nas ferramentas cerâmicas de referência e texturizada.

Figura 65 – MO das calotas formadas sobre a superfície de saída ( $A_\gamma$ ) das ferramentas cerâmicas. (a) Ferramenta de referência (sem textura); (b) Ferramenta texturizada

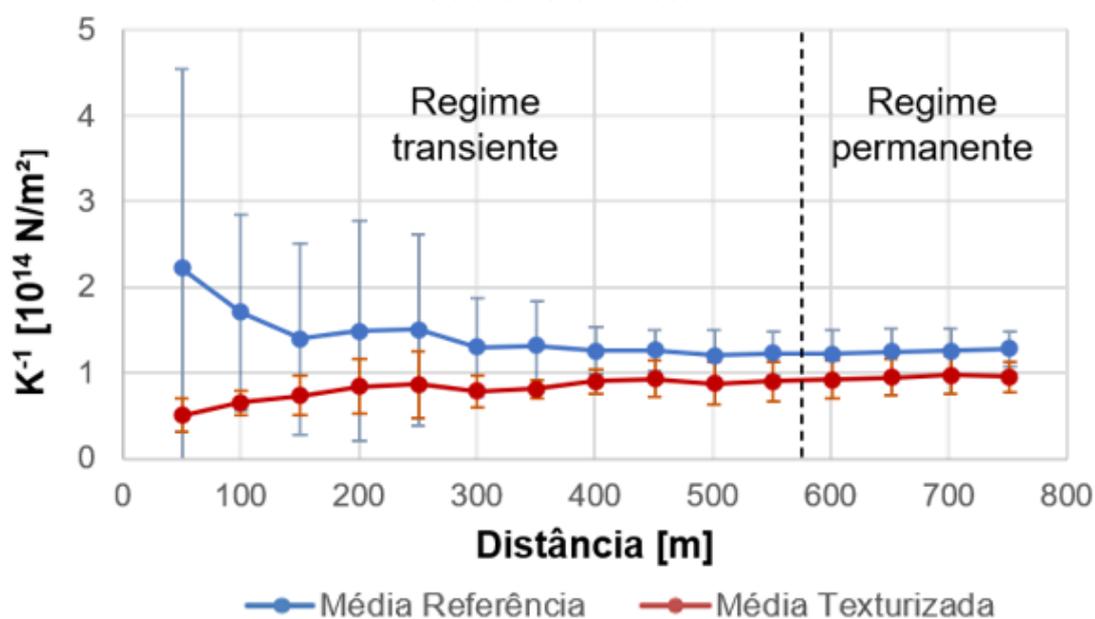


Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se na Figura 65 calotas circulares geradas na superfície de saída dos insertos. Após a realização da distância total de deslizamento notou-se que nas amostras texturizadas as ranhuras ainda permaneceram presentes. Além disso, cabe ressaltar que a perpendicularidade das marcas de desgaste em relação as ranhuras foram respeitadas. Este quesito foi considerado de extrema importância para a realização do ensaio nas amostras texturizadas, uma vez que o objetivo foi simular o tribossistema da interface cavaco-ferramenta, em que o cavaco tende a sair perpendicularmente à aresta de corte sobre a superfície de saída do inserto. Assim a esfera simulou o movimento do cavaco sobre  $A_\gamma$ , e o padrão de textura era paralelo à aresta de corte.

Na Figura 66 é apresentada a resistência ao desgaste microabrasivo ( $K^{-1}$ ) em função da distância deslizada, plotada no formato de gráfico de linha. Através dele pode-se observar que ambas as amostras atingiram o regime permanente. Marques (2018) e Ramos (2018) consideram que o regime permanente é alcançado quando a variação (% erro) dos últimos quatro resultados do ensaio em função da distância de deslizamento forem menores do que 7%.

Figura 66 – Gráfico desgaste abrasivo ( $K^{-1}$ ) em função da distância deslizada (m) para a amostra de referência e texturizada



Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 29 apresenta os resultados médios dos diâmetros das calotas e da resistência ao desgaste microabrasivo ( $K^{-1}$ ) obtidos a partir dos últimos três valores medidos nos ensaios de três amostras de referência e texturizada, totalizando uma média obtida com nove valores para cada tratamento investigado.

Tabela 29 – Diâmetro médio da calota ( $b_{\text{médio}}$ ) e resistência média ao desgaste microabrasivo ( $K_{\text{médio}}^{-1}$ ) para cada tipo de ferramenta ensaiada (Texturizada ou sem textura)

Tratamento	$b_{\text{médio}}$ [mm]	$K_{\text{médio}}^{-1}$ [ $10^{14}$ N/m <sup>2</sup> ]
Referência	1,163±0,007	1,259±0,013
Texturizada	1,248±0,014	0,955±0,020

Fonte: Produção do próprio autor.

Para melhor interpretação dos resultados da Tabela 29 foi realizada uma análise de variância do tipo ANOVA ONE WAY entre os tratamentos, referência e

texturizada. Para tanto, foi considerado um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%, ver Tabela 30.

Tabela 30 – ANOVA para os resultados de desgaste abrasivo

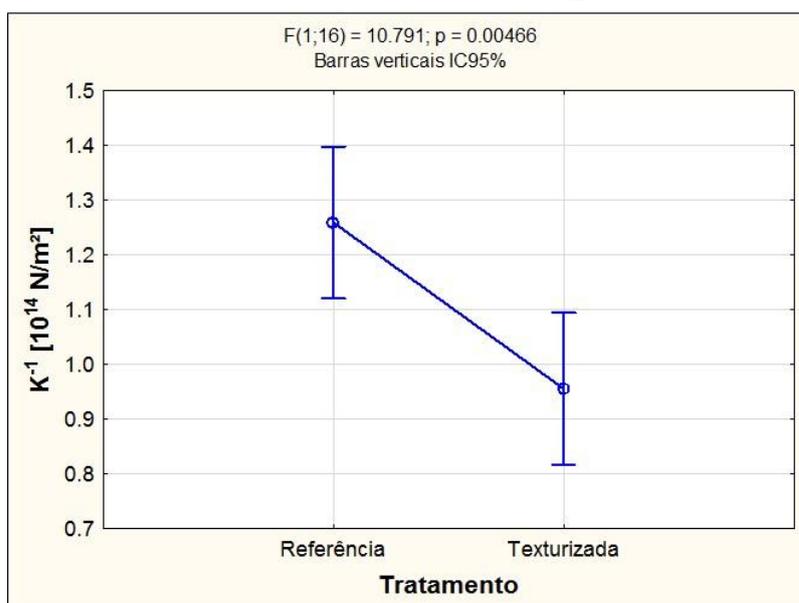
Efeito	SQ	GL	QM	F	p
Média	22,07400	1	22,07400	573,4386	0,000000
Tratamento	0,41540	1	0,41540	10,7913	0,004664
Erro	0,61591	16	0,03849		

Fonte: Produção do próprio autor.

Percebe-se que a análise de variância para resistência ao desgaste microabrasivo ( $K^{-1}$ ) mostrado na Tabela 30, apresentou diferença significativa entre os tratamentos. De modo que o nível de significância calculado ( $p = 0,004664$ ) foi menor do que o critério estatístico pré-estabelecido de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Portanto, pode-se afirmar que existe diferença significativa entre as superfícies de referência e texturizada.

Através do gráfico de efeitos, ver Figura 67, observa-se a diferença entre os tratamentos. Verifica-se que a resposta de resistência ao desgaste microabrasivo para a superfície texturizada foi em média 24% inferior em relação à superfície de referência.

Figura 67 – Gráfico de efeitos da resistência ao desgaste microabrasivo ( $K^{-1}$ ), considerando o tratamento: Referência e Texturizada



Fonte: Produção do próprio autor.

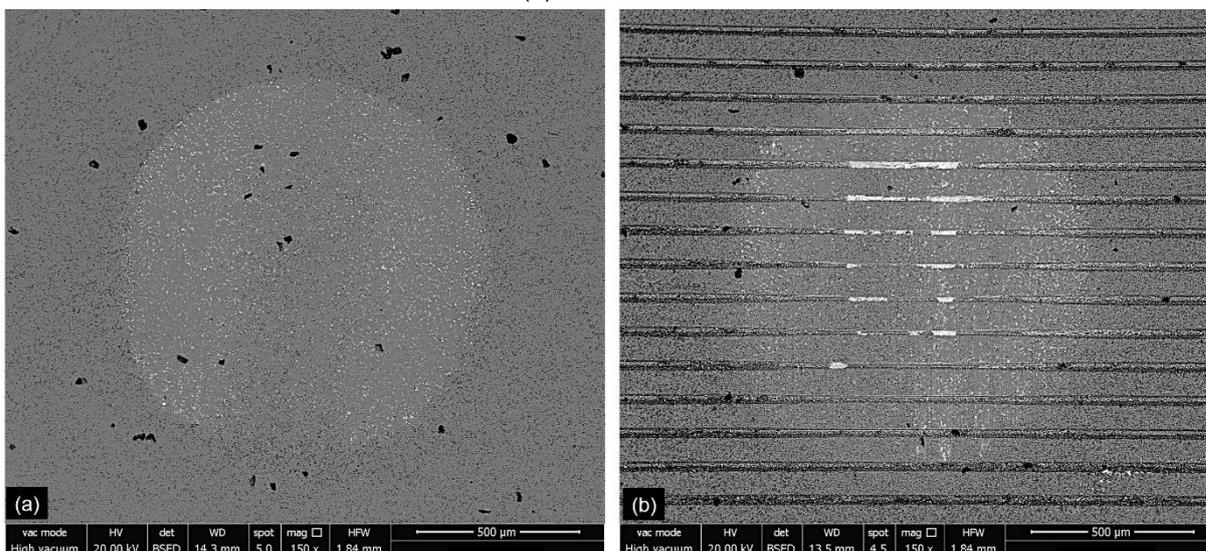
Melo (2018) encontrou resultados semelhantes no ensaio de microabrasão em ferramentas cerâmicas a base de alumina, texturizadas e de referência. No trabalho citado foram feitos ensaios com três tipos de ferramentas cerâmicas, uma sem textura (Referência), e duas texturizadas (T1 e T2), sendo que o passo da ferramenta T1 era de 83  $\mu\text{m}$  e para a ferramenta T2 era de 103  $\mu\text{m}$ . Ele observou um aumento de 45% quando se comparou a referência com a texturizada T1. Ao comparar referência e texturizada T2, observou-se um aumento de 16% de resistência ao desgaste. Finalmente, na comparação entre as texturizadas T1 e T2, a última foi 31% maior. Para o ensaio e condições de teste compreende-se que quanto maior o passo da textura, mais a superfície se aproxima da resistência ao desgaste da referência.

Esteves (2015) avaliou a influência da texturização a laser de femtossegundos, na superfície de saída de ferramentas de metal duro na resposta de resistência ao desgaste abrasivo. Como resultado obteve-se uma melhora no desempenho tribológico, em que houve um aumento de 8% e 54% na resistência ao desgaste abrasivo para Textura 1 (passo de 65  $\mu\text{m}$ ) e Textura 2 (passo de 95  $\mu\text{m}$ ), respectivamente, em comparação com a superfície de referência. Os resultados sugerem que o material da ferramenta texturizada e o passo das texturas influenciaram na resistência ao desgaste abrasivo.

Na Figura 68, obtida a partir de MEV, é apresentado imagens representativas das calotas de desgaste das amostras cerâmicas de referência, ver Figura 68 (a), e texturizada, ver Figura 68 (b), ambas com geometrias aproximadamente circulares.

Na Figura 69 tem-se a calota da amostra de referência com três áreas em destaque: centro, lateral direita e porção inferior da calota. As análises por microscopia indicam a predominância de micromecanismo a dois corpos, com riscos paralelos na direção de rotação da esfera. A presença de *scuffing* na borda da calota ocorre, mas é pouco evidente. As manchas pretas na imagem são impurezas devendo ser desconsideradas.

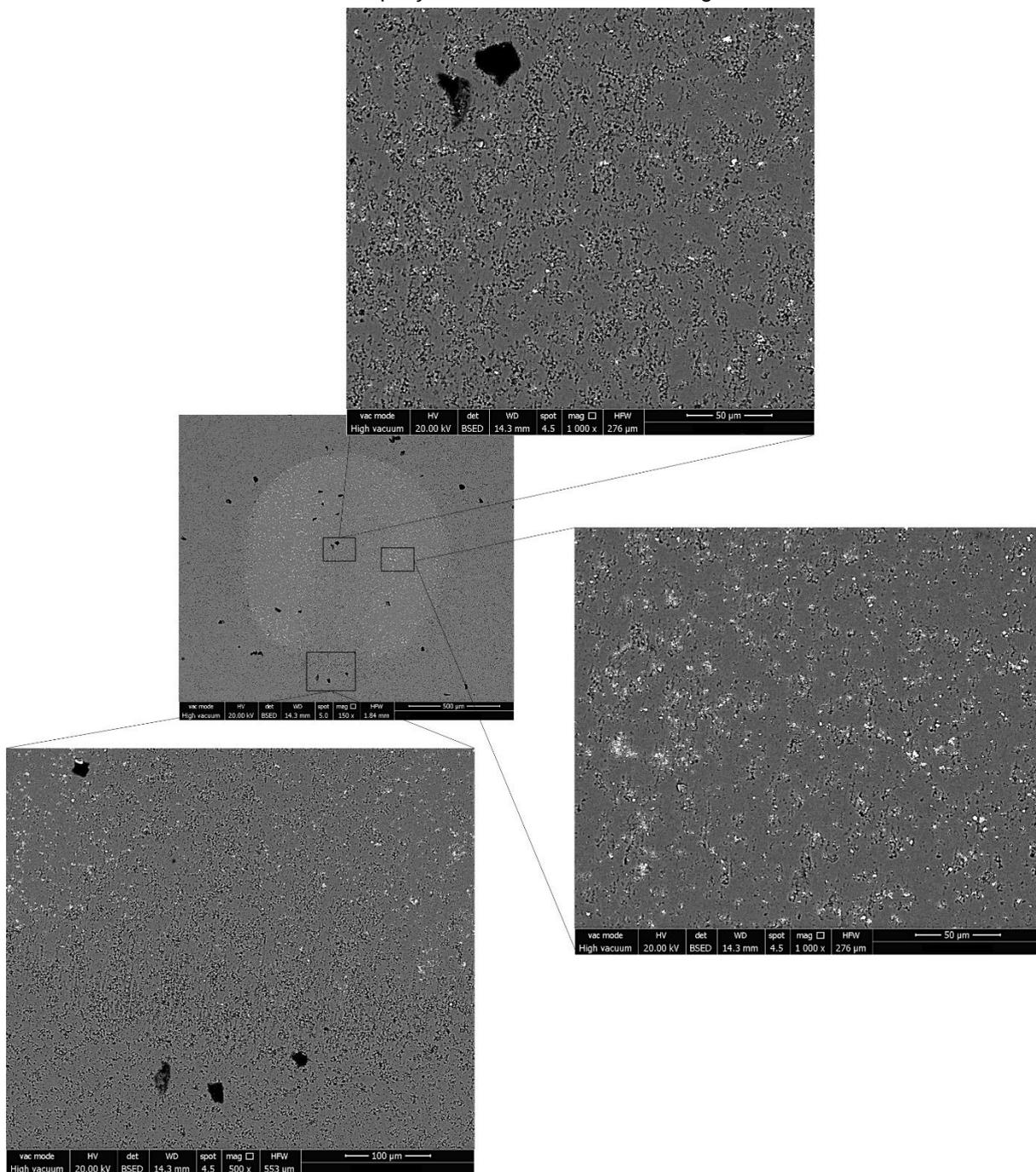
Figura 68 – Imagens em MEV da calota de desgaste da amostra cerâmica. (a) Referência; (b) Texturizada



Fonte: Produção do próprio autor.

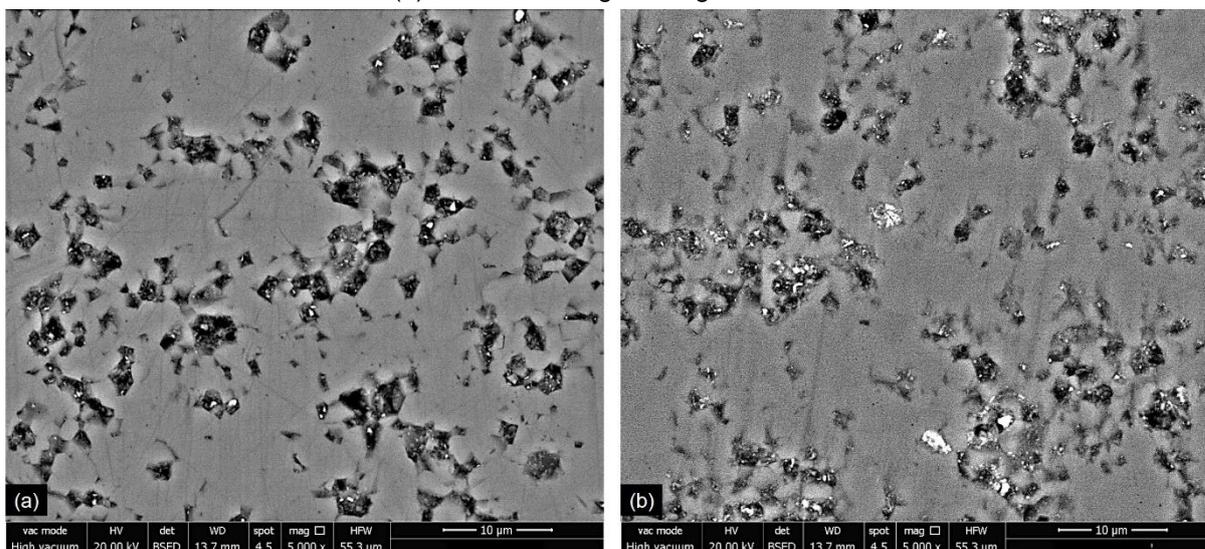
Na Figura 70 apresenta-se imagens da amostra de referência com maior aumento para evidenciar o micromecanismo abrasivo. Na Figura 70 (a) tem-se uma imagem de uma superfície plana distante da região de ensaio, que caracteriza a superfície padrão ou comercial da amostra cerâmica, no caso a superfície de saída da ferramenta. Nota-se que a ferramenta possui uma textura característica, com depressões aleatórias, devido ao processo de fabricação por metalurgia do pó. Observa-se ainda riscos aleatórios nas regiões planas, o que sinaliza que a superfície da ferramenta foi retificada, como esperado. Na Figura 70 (b) tem-se uma imagem da região central da calota de desgaste. Nota-se as mesmas depressões características do material, o que não configura mecanismo de rolamento, por outro lado observa-se riscos paralelos, evidenciando o micromecanismo de riscamento.

Figura 69 – Imagem em MEV da amostra cerâmica de referência com três áreas em destaque: centro, lateral e porção inferior da calota de desgaste



Fonte: Produção do próprio autor.

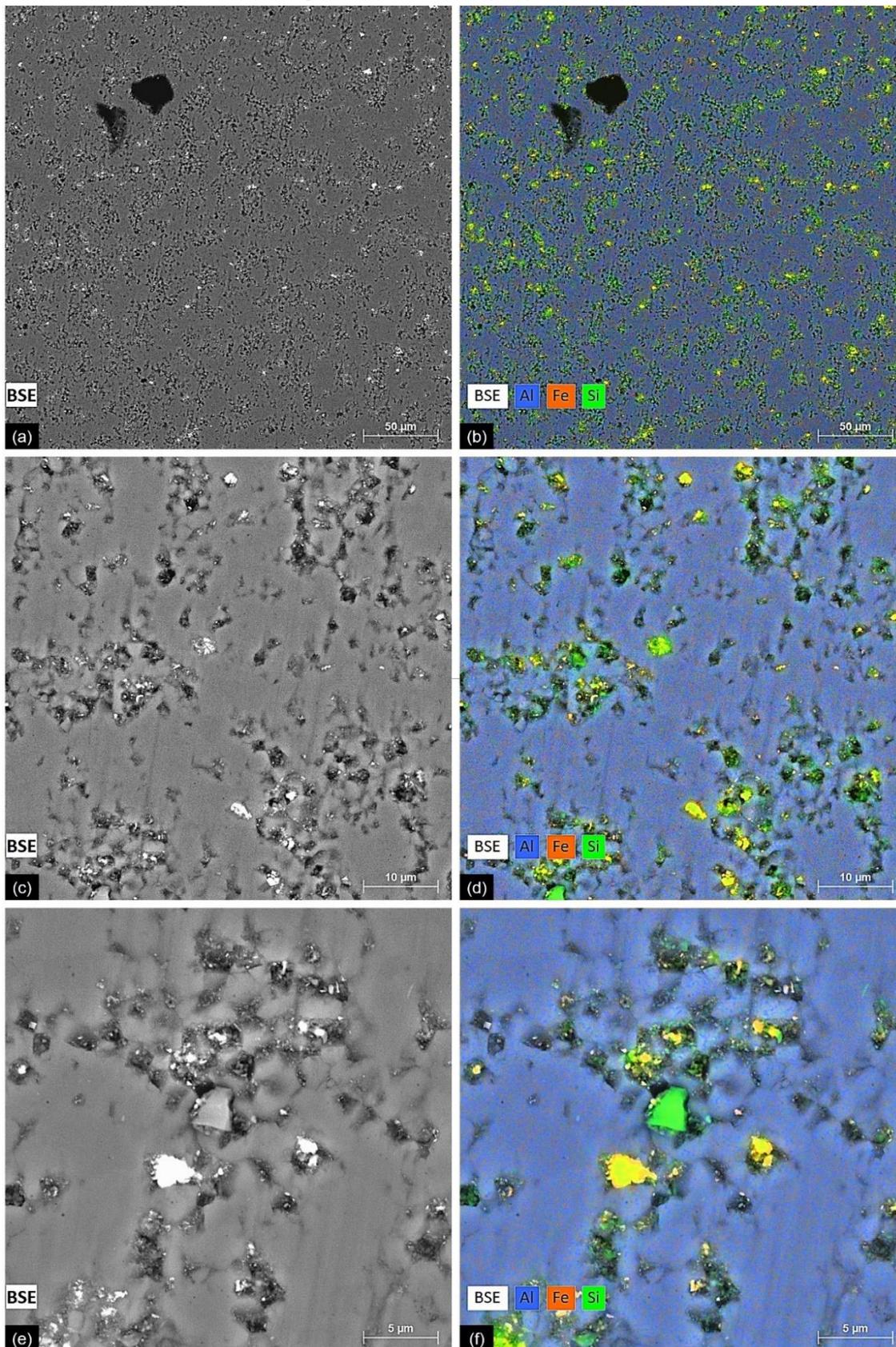
Figura 70 – Imagem em MEV amostra de referência. (a) Superfície de saída da ferramenta (plana);  
(b) Calota de desgaste região central



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 71 tem-se imagens em MEV e mapeamento químico da amostra de referência na região central da calota para diferentes aumentos. Na Figura 71 (a) e (b) nota-se o elemento químico Al indicando que a amostra cerâmica tem como base  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Além disso, nota-se vestígios de Fe do material da esfera (aço inoxidável martensítico) e Si do material do abrasivo (SiC). Na Figura 71 (c) e (d) tem-se uma maior ampliação, em que se pode notar, riscos paralelos na direção de rotação da esfera, caracterizando o micromecanismo a dois corpos. As marcas dos riscos são suaves, porque a dureza do material cerâmico é elevada (1700 HV). Na Figura 71 (e) e (f) observa-se riscos paralelos na região plana, além de abrasivo e material da esfera preso nas depressões da amostra cerâmica.

Figura 71 – Imagem em MEV/EDS amostra de referência, calota de desgaste, região central.  
(a) Imagem 1000x; (b) Mapa químico 1000X. (c) Imagem 5000x; (d) Mapa químico 5000X;  
(e) Imagem 10000x; (f) Mapa químico 10000X

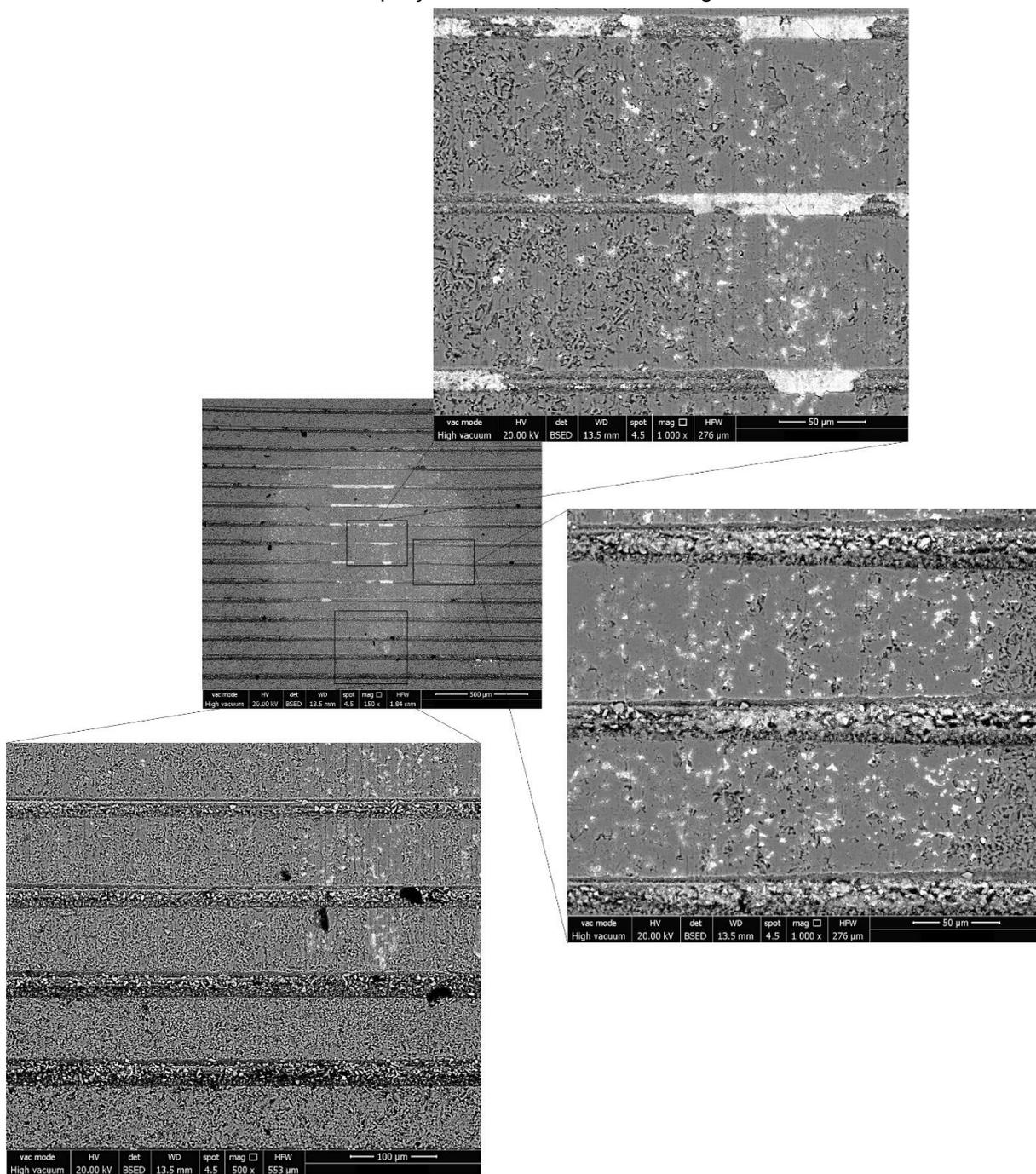


Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 72 tem-se a calota da amostra texturizada, destacando três regiões: centro, lateral direita e porção inferior da calota. As análises por microscopia também mostram predominância do micromecanismo a dois corpos, com riscos paralelos na direção de rotação da esfera. Nota-se ainda uma maior presença de material da esfera aderido à ranhura na porção central da calota. A presença de *scuffing* na borda da calota ocorre, mas sem relevância. As manchas pretas na imagem são impurezas devendo ser desconsideradas.

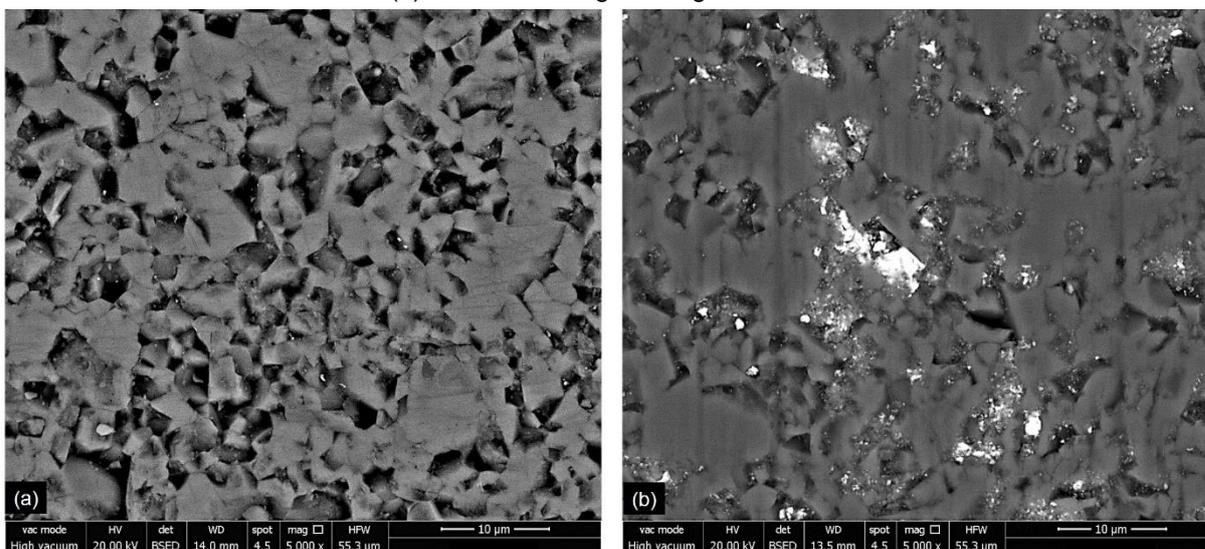
Na Figura 73 apresenta-se imagens da amostra texturizada em uma maior ampliação para evidenciar o micromecanismo abrasivo. Na Figura 73 (a) tem-se uma imagem da superfície plana da amostra distante da região de ensaio. Novamente, nota-se que a ferramenta possui uma textura característica, com depressões aleatórias. Observa-se ainda riscos aleatórios nas regiões planas, evidenciando que a superfície da ferramenta foi retificada. Na Figura 73 (b) tem-se uma imagem da região central da calota. Nota-se as depressões características da superfície da ferramenta, por outro lado observa-se riscos paralelos mais pronunciados do que da amostra de referência, evidenciando o micromecanismo de riscamento. As imagens concordam com o resultado quantitativo, que indicaram que a amostra de referência apresentou maior resistência ao desgaste ( $K^{-1}$ ).

Figura 72 – Imagem em MEV da amostra cerâmica texturizada com três áreas em destaque: centro, lateral e porção inferior da calota de desgaste



Fonte: Produção do próprio autor.

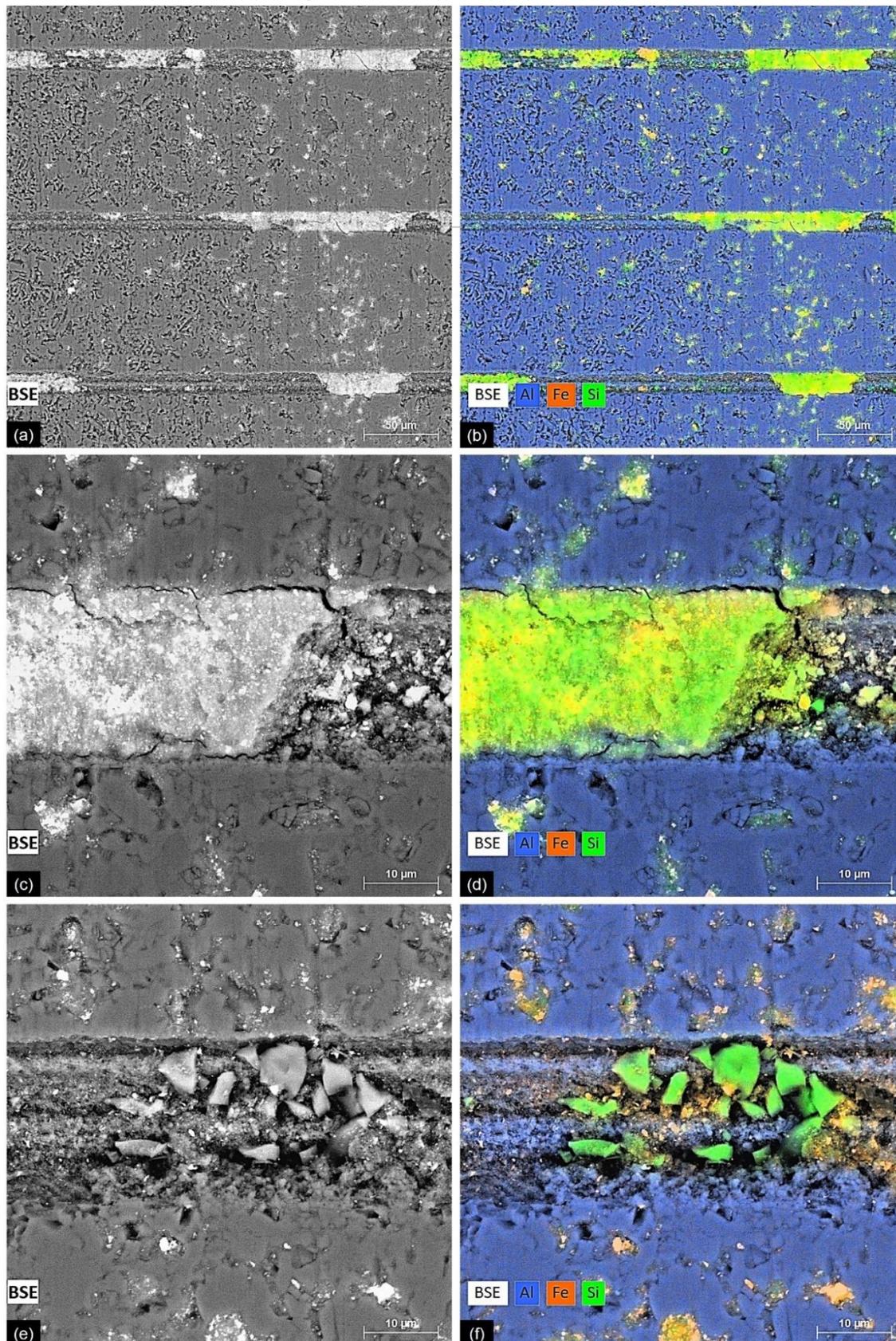
Figura 73 – Imagem em MEV amostra texturizada. (a) Superfície de saída da ferramenta (plana);  
(b) Calota de desgaste região central



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 74 tem-se imagens em MEV e mapeamento químico da amostra texturizada na região central da calota para diferentes aumentos. Na Figura 74 (a) e (b) nota-se os elementos químicos Al, Fe e Si identificando  $\text{Al}_2\text{O}_3$  da cerâmica (corpo), material do contra-corpo (aço inoxidável martensítico) e material do abrasivo (SiC), respectivamente. Nota-se o material da esfera aderido nas ranhuras e vestígio do material do abrasivo aderido sobre o material da esfera aprisionado dentro do canal. Os riscos paralelos indicando abrasão a dois corpos são mais evidentes do que na amostra de referência. Na Figura 74 (c) e (d) tem-se uma maior ampliação, em que se pode observar de maneira mais clara, o material da esfera aprisionado na ranhura e resíduos de SiC aderido no material do contra-corpo preso no canal. Nota-se que o material da esfera pode em algum momento se destacar da ranhura. Na imagem também tem evidência dos riscos paralelos. Na Figura 74 (e) e (f) evidencia-se principalmente o abrasivo dentro da ranhura. As imagens indicam que a textura pode ter funcionado como um reservatório de material abrasivo, o que justificaria o maior desgaste em relação à referência.

Figura 74 – Imagem em MEV/EDS amostra texturizada, calota de desgaste, região central.  
(a) Imagem 1000x; (b) Mapa químico 1000X. (c) Imagem 5000x; (d) Mapa químico 5000X;  
(e) Imagem 10000x; (f) Mapa químico 10000X



Fonte: Produção do próprio autor.

O ensaio de desgaste microabrasivo teve um caráter comparativo entre os tratamentos (referência e texturizada). Todavia, algumas considerações podem ser feitas em relação ao ensaio. A textura funcionando como um reservatório de material abrasivo, altera-se a concentração local de abrasivo. Além disso, se a área de contato for analisada nas condições reportadas de diâmetro médio de calota e a presença de material aderido nos canais da textura, assim como esta área for desprezada, observará que a área de contato real para a amostra texturizada foi menor. Dessa forma, a superfície texturizada experimentou pressão aproximadamente 9% maior do que a de referência. No entanto, se a concentração do abrasivo diminuir ou for suspensa, da mesma forma se o passo entre as texturas for alterado, os canais podem servir como um depósito de debris do material da esfera e com isso o fenômeno *clogging effect* poderá ser melhor observado, com diminuição do atrito e desgaste.

## 6 CONCLUSÃO

Apartir dos resultados obtidos através da análise feita com DRX, verificou-se a presença predominante da alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), assim como, também foi identificado a zircônia ( $\text{ZrO}_2$ ) e Óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ). Os resultados obtidos confirmaram a informação fornecida pelo fabricante da ferramenta, sobre a composição química do material.

Ao caracterizar as dimensões das texturas, notou-se que o desvio em relação às dimensões médias de profundidade ( $13,408 \mu\text{m}$ ), largura ( $25,551 \mu\text{m}$ ) e passo ( $103,088 \mu\text{m}$ ) foi pequeno. As imagens em MEV sugerem a presença de material fundido aprisionado na parede da ranhura, devido ao mecanismo de ablação. Não foi encontrado trincas após o processo de texturização. Portanto, pode-se afirmar que o laser de pulsos ultracurtos foi capaz de realizar a microusinagem sem provocar danos a estrutura. O mesmo vale para os insertos texturizados utilizados no ensaio de microabrasão.

Os resultados da análise estatística de Fu mostraram que a texturização da ferramenta cerâmica não favoreceu a usinagem do ferro fundido cinzento (FC250). Com ferramenta texturizada houve um aumento médio de 5% em relação a ferramenta de referência. A diferença foi pequena, porém significativa. Observa-se também que o aumento do avanço (0,20 e 0,25 mm/volta) teve um efeito maior para a ferramenta de referência (4%) do que para a texturizada (0,07%).

Os valores de temperatura na usinagem no FC250, mostraram que existe uma interação entre ferramenta e avanço, de modo que o aumento do avanço teve menor influência para a ferramenta texturizada ( $-0,3^\circ\text{C}$ ) do que para a de referência ( $+11,2^\circ\text{C}$ ).

Quando comparado os desvios microgeométricos do FC250, a ferramenta texturizada obteve um aumento em Ra de 4% e Rz de 1,5%, apesar dos valores serem maiores, pode-se afirmar que não existe diferença significativa entre os padrões de ferramenta avaliados. Os resultados também mostraram, como esperado, que aumentar o avanço influencia no aumento da rugosidade, independente da ferramenta utilizada.

Para valores de circularidade, ambas ferramentas testadas na barra de ferro fundido, geraram valores de desvio similares,  $5,341 \mu\text{m}$  para referência e  $5,349 \mu\text{m}$

para texturizada, contudo, o aumento do avanço possibilitou uma redução estatisticamente significativa no desvio de circularidade de 32% (2,027  $\mu\text{m}$ ).

Na análise de esforços de corte ( $F_u$ ) da barra de aço inoxidável martensítico (VSM13), a ferramenta texturizada apresentou um aumento médio de 0,6% em relação aos valores de referência, essa diferença não foi significativa. Aumentando o avanço percebeu-se um aumento significativo em  $F_u$  de 15%. Todavia, em  $f = 0,25$  mm/volta a ferramenta texturizada apresentou valores médios de  $F_u$  2% menores. Além disso, observou-se menor aumento percentual para a ferramenta texturizada ao variar o avanço.

Quanto ao grau de recalque ( $R_c$ ) a ferramenta texturizada proporcionou uma pequena redução média (1,5%) no valor  $R_c$  para o VSM13. Como esperado, o incremento do avanço promoveu um aumento no valor médio de  $R_c$  de 21%, sugerindo maior deformação do cavaco em função do aumento do avanço.

Os parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  no VSM13 também apresentaram aumento quando foi utilizado as ferramentas texturizadas.  $R_a$  teve um aumento médio de 14% e  $R_z$  de 9%, em ambos os casos o aumento não foi estatisticamente significativo. O aumento do avanço promoveu aumento significativo da rugosidade.

Nos resultados de circularidade, a ferramenta texturizada não apresentou diferença significativa em relação à de referência, embora tenha havido uma redução no desvio de circularidade em torno de 10%, quando utilizado os insertos texturizados. Aumentando-se o avanço, observou-se um aumento estatisticamente significativo no desvio de circularidade de 959%. Esse resultado está relacionado à grande deformação que o aço inoxidável sofre durante a usinagem e as vibrações observadas no sistema peça-ferramenta-máquina.

Os resultados de resistência ao desgaste abrasivo ( $K^{-1}$ ) mostraram que a superfície texturizada foi 24% menos resistente ao desgaste do que a de referência, podendo se afirmar, que este resultado é estatisticamente significativo.

Os resultados de microscopia eletrônica por varredura (MEV) mostraram a presença de material abrasivo (SiC) em ambas superfícies de referência e texturizada, porém, a quantidade deste material foi maior nas amostras texturizadas. Pelas imagens percebeu-se que o micromecanismo de desgaste predominante foi por riscamento, sendo mais pronunciado na superfície texturizada.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a influência das dimensões e geometria das texturas nos resultados de força de usinagem e microabrasão, variando passo, formatos e a distância entre a aresta principal de corte até a primeira ranhura;
- Estudar a influência da variação do material usinado e de contra-corpo no desempenho dos insertos cerâmicos texturizados nos ensaios de força e de microabrasão;
- Realizar o ensaio de microabrasão diminuindo a concentração de abrasivo ou até mesmo a seco;
- Estudar a influência das texturas nas ferramentas, considerando a evolução do desgaste durante a usinagem.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Informação e documentação: Referências. Rio de Janeiro. 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR ISO 4288**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6409**: Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho: Referências. Rio de Janeiro. 1997.
- ADACHI, K.; HUTCHINGS, I. M. Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test. **Wear**, v. 255, p. 23-29, 2003.
- AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2002.
- BAHI, S.; NOUARI, M.; MOUFKI, A.; EL MANSORI, M.; MOLINARI, A. Hybrid modelling of sliding-sticking zones at the tool-chip interface under dry machining and tool wear analysis. **Wear**, v. 286–287, p. 45–54, 2012.
- BÄHRE, D.; SCHMITT, C.; MOOS, U. Analysis of the differences between force control and feed control strategies during the honing of bores. **Procedia CIRP**, Conference on High Performance Cutting, v.1, p.377-381, 2012.
- BAJIĆ, D.; CELENT, L.; JOZIĆ, S. Modeling of the influence of cutting parameters on the surface roughness, tool wear and cutting force in face milling in off-line process control. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 58, p. 673-682, 2012.
- BARBOSA, P.A. **Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis**. 2014. 234 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo, 2014.
- BARBOSA, P.A.; BERTOLETE, M.; SAMAD, R.E.; JÚNIOR, N.D.V.; MACHADO, I.F.; MACHADO, Á.R.; VILAR, R.; DE ROSSI, W. Investigation of Femtosecond Laser Texturing in Cemented Carbide Cutting Tools. In Proceedings of the **Laser in Manufacturing Conference – LiM**. Munich, Germany, 2015.
- BERTOLETE, M., BARBOSA, P.A., MACHADO, Á.R. et al. Effects of texturing the rake surfaces of cemented tungsten carbide tools by ultrashort laser pulses in machining of martensitic stainless steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 98, p. 2653–2664, 2018.
- BIJWE, J.; INDUMATHI, J.; RAJESH, J. J.; FAHIM, M. Friction and wear behavior of polyetherimide composites in various wear modes. **Wear**. v. 249, p. 715-726, 2001.
- BOBZIN, K. High-performance coatings for cutting tools. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, 18, p. 1–9, 2017
- BONIECKI, M.; GOŁĘBIEWSKI, P.; WESOŁOWSKI, W.; WOLUNTARSKI, M.; PIĄTKOWSKA, ANNA; ROMANIEC, M.; CIEPIELEWSKI, P.; KRZYŻAK, K. Alumina/zirconia composites toughened by the addition of graphene flakes. **Ceramics International**, v. 43, n. 13, p. 10066-10070, 2017.
- BOOTHROYD, G. **Fundamentals of metals machining and machine tools**. 5nd ed. International student edition. Nova York: McGraw Hill, 1981.
- BULJAN, S. T.; SARIN, V.K. The future of silicon nitride cutting tools. **The Carbide and Tool Journal**, p. 4-7, 1985.
- BURAKOUZKI T.; WIERZCHON, T., **Surface Engineering of Metals** - Principles, Equipments, Technologies, Ed. CRC Press LCC, Poland, p. 592,1999.
- CALLISTER, J. D. G. R., WILLIAM D. **Ciência e engenharia dos materiais uma introdução**. 8°. ed. Rio de janeiro: Ltc, 2012.

- CATAPAN, M. F. **Apostila de desenho mecânico 1**. Curitiba: UFPR, 2013.
- CARNEIRO, M.B. **Fabricação de ferramentas de corte em gradação funcional por Spark Plasma Sintering (SPS)**. 2014. 168 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo, 2014.
- CHILDS, T.H.C. Friction modelling in metal cutting. **Wear**, v. 260, p. 310–318, 2006.
- COSTA, H.; HUTCHINGS, I. Some innovative surface texturing techniques for tribological purposes. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 229, n. 4, p. 429–448, abr. 2015.
- DEDALUS CONSULTING. Cutting Tools: World Markets, End-Users and Competitors: 2010-2015. **Analysis & Forecast**, p. 500, 2011.
- DENG, J.; LIAN, Y.; WU, Z.; XING, Y. Performance of femtosecond laser-textured cutting tools deposited with WS<sub>2</sub> solid lubricant coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 222, p. 135–143, 2013.
- DIELS J. C.; RUDOLPH, W. **Ultrashort laser pulse phenomena: fundamentals, techniques, and applications on a femtosecond time scale**, 2nd Ed. New York: Elsevier/Academic Press, p. 680, 2006.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber Editora Ltda. p. 63, 2014.
- DUBEY, K.; YADAVA, V. Laser beam machining - A review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 609-628, 2008.
- ESTEVES, P.J., **Efeito da Texturização por Laser de Pulsos Ultracurtos na Resistência ao Desgaste Microabrasivo de Ferramentas de Corte de Metal duro**. 2015. (Graduando em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, p.38. 2015.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, p. 751, 1970.
- GACHOT, C.; ROSENKRANZ, A.; HSU, S. M.; COSTA, H. L. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. **Wear**, v. 372–373, p. 21–41, 15, 2017.
- GAMALY, E.G.; RODE A.V.; TIKHONCHUK, V.T.; LUTHER-DAVIES, B. Ablation of solids by femtosecond lasers: Ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics. **Physics of Plasmas**, v. 9, n. 3, p. 949, 2002.
- GANT A. J, GEE M. G. A review of micro-scale abrasion testing. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 2011.
- GAHLIN, R.; JACOBSON, S. The particle size effect in abrasion studied by controlled abrasive surfaces. **Wear**, Uppsala, p.118-125, 1999.
- GEE, M.G., GANT, A., HUTCHINGS, I.M., BETHKE, R., SCHIFFMANC, K., VANACKER, K., POULAT, S., GACHONF, Y., VON STEBUT, J. Progress Towards Standardisation Of Ball Cratering. **Wear**, Vol. 255, p. 1-13, 2003.
- GERMAN, R.M. **Sintering theory and practice**. New York: John Wiley & Sons Inc, 550 p, 1996.
- GÓMEZ, V.A.O., **Efeito da Distribuição do Tamanho das Partículas Abrasivas sobre as Taxas e Modos de Desgaste para o Ensaio de Microabrasão**. Dissertação De Mestrado. Departamento De Engenharia Mecânica Da Universidade Federal de Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brasil, 2014.
- GROOVER, M.P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems**. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., p. 1025, 2010.
- GRUSS, W.W. Turning of steel with ceramic cutting tools. **Tool Materials for HKH- Speed Machining**, ASM International, p. 105-115, 1987.

- HE, F.; NI, J.; ZENG, B. CHENG, Y.; SUGIOKA, K. Spatiotemporal manipulation of ultrashort pulses for three-dimensional (3-D) laser processing in glass materials. **Laser Surface Engineering: Processes and Applications**, p. 383–404, 2015.
- HEUBERGER, M.; FELDMAN, M.; ZÄCH, M.; SPENCER, N. D.; Dynamic control of friction via surface structuring. **Tribology Series**. Elsevier, v. 40, p. 67–73, 2002.
- HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2nd ed. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2017.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685:1993** Tool life testing with single-point turning tools, 1993.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12181:2011** Geometrical product specifications (GPS) — Roundness, 2011
- JOSHI, B.; TRIPATHI, K; GYAWALI, G.; LEE, S. W. The effect of laser surface texturing on the tribological performance of different Sialon ceramic phases. **Progress in Natural Science: Materials International**. V. 26, p. 415-421, 2016.
- KAWASEGI, N.; SUGIMORI, H; MORIMOTO, H.; MORITA, N.; HORI, I. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior. **Precision Engineering**, v. 33, n. 3, p. 248–254, 2009.
- KLEINS TOOLS. **Emissivity chart: non-metal and metal materials**. Disponível em: <<https://www.kleintools.com/sites/kleintools/files/instructions/Emissivity-Chart-139697ART.pdf>>. Acesso em: 09 jan. 2023.
- KOMANDURI, R.; SAMANTA, S.K. **Ceramics**, ASM Handbook. Machining, ASM International, v. 16, p. 98-104, 1989.
- KUMAR, A. S.; DURAI, A. R.; SORNAKUMAR, T. The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 173, n. 2°, p. 151-156, 2006.
- KUMAR, C. S.; PATEL, S. K. Effect of duplex nanostructured TiAlSiN/TiSiN/TiAlN-TiAlN and TiAlN-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN coatings on the hard turning performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN ceramic cutting tools. **Wear**, v. 418–419, p. 226-240, 2019.
- LIANG, W.L.; NGOI, B.K.A.; LIM, L.E.N.; VENKATAKRISHNAN, K.; HEE, C.W. Micromachining of circular ring microstructure by femtosecond laser pulses. **Optics and Laser Technology**, v. 35, p. 285–290. 2003.
- MACHADO, A. R. et al. State of the art of tool texturing in machining. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 293, p. 117096, 2021.
- MACHADO, Á.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M.B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3ª ed. São Paulo: Blucher, p. 406, 2015.
- MACHADO, L.M.; SAMAD, R.E.; FREITAS, A.Z.; JÚNIOR, N.D.V.; BERRETTA, J.R.;
- ROSSI, W. **Corte de Metais por Ablação com Pulsos Laser Ultracurtos**, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. Estância de São Pedro, São Paulo. Anais: 4° CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – 4°COBEF. São Paulo. 2007.
- MAHR. **Basics of Surface Metrology**, p. 52, 2010.
- MÁQUINAS E METAIS. Guia III: **Fornecedores de Pastilhas Cerâmicas**. Máquinas e Metais. n.558, p. 100-102, 2012,
- MARQUES, F.P. **Comportamento tribológico de três superligas de cobalto em ensaios de microabrasão**. 2018. 139 f. Tese de Doutorado (Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos de Tecnologia**. 4°. ed. Belo Horizonte: Elsevier, 2016.

- MELO, C. R. **Avaliação tribológica de ferramentas de usinagem cerâmicas texturizadas por laser de pulsos ultracurtos**. 2018. 59 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduando em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.
- MERCHANT, M.E. Mechanics of the metal cutting process. I Orthogonal cutting and type 2 chip. **Journal Applied Physics**, v. 16, n.5, p. 267-275, 1945.
- MEYERS, M.; CHAWLA, K. **Mechanical Behavior of Materials**. 2nd. ed. New York: Cambridge, 2009.
- MIRIM, D. de C. **Desenvolvimento de processos de microusinagem com laser de pulsos ultracurtos**. 2016. 139 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- MUMMERY, L. Surface texture analysis – The handbook. **Hommelwerke GmbH**, 1992.
- NATHAN, V.; MITRA, S. S.; GUENTHER, A. H. Review of multiphoton absorption in crystalline solids. **Journal of the Optical Society of America B**, v. 2, n. 2, p. 294-316, 1985.
- NEVES, D.; DINIZ, A.E.; de LIMA, M.S.F. Efficiency of the laser texturing on the adhesion of the coated twist drills. **Journal of Materials Processing Technology**, 179, 139–145, 2006.
- NOLTE, S.; MOMMA, C.; JACOBS, H.; TÜNNERMANN, A.; CHICHKOV, B. N.; WELLEGEHAUSEN, B.; WELLING, H. Ablation of metals by ultrashort laser pulses. **Journal of the Optical Society of America B**, v. 14, n. 10, p. 2716-2722, 1997.
- NORTON, F. H. **Elements of ceramics**. Cambridge: Addison-Wesley, 1952.
- NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2013.
- NOVELATO, S. G. P.; CARNEIRO, B. M.; BARBOSA, A. P.; MACHADO, R. A.; SAMAD, R. R.; VIEIRA, J. D. N.; de ROSSI, W.; ALMEIRA, A. "Avaliação do desempenho de ferramenta de corte cerâmica texturizada na usinagem de ferro fundido cinzento", **In IX Congresso Brasileiro de Fabricação - COBEF**, Joinville, Santa Catarina. 2017.
- OTITOJU, T. A.; OKOYE, P. U.; CHEN, G.; YANG, L.; ONYEKA, M. O.; SANXI, L.; Advanced ceramic components: Materials, fabrication, and applications. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 85, p. 34-65, 2020.
- PAWELSKI, O.; RASP, W.; ZWICK, W.; NETTELBECK, H. J.; STEINHOFF, K. The influence of different work-roll texturing systems on the development of surface structure in the temper rolling process of steel sheet used in the automotive industry. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 45, n. 1, p. 215–222, 1994.
- PETTERSSON, U. **Surfaces designed for high and low friction**. Uppsala: Uppsala: Institutionen för teknikvetenskaper, 2005.
- PIGARI, A. C. **Monitoramento do Desgaste da Ferramenta no Processo de Torneamento usando Emissão Acústica**. 130 f. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Engenharia dos Materiais) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.
- RAHAMAN, M. N. **Ceramic processing and sintering**. 2nd. ed. New York: Marcel Dekker, 2003.
- RAMOS, F. D. **Comportamento em desgaste microabrasivo de superligas de cobalto produzidas por laser cladding e fundição**. 2018. 131 f. Dissertação de mestrado (Mestrado em engenharia mecânica) -Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.
- REED, Reed, J. S. **Principles of ceramic processing**. 2 ed. New York: Wiley-Interscience, 1995.
- ROSSI, W.; MACHADO, L.M.; JÚNIOR, N.D.V.; SAMAD, R.E. D. Scan Measurement of the Ablation Threshold and Incubation Parameter of Optical Materials in the Ultrafast Regime. **Physics Procedia**. v.39, pp. 642-649. 2012.
- RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, I. M. A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. **Surface and Coatings Technology**. v. 79, p. 231-239, 1996.
- SAMAD, R.E.; MACHADO, L.M., VIEIRA Jr., N.D.; de ROSSI, W. Ultrashort laser pulses machining, **In: Laser Pulses – Theory, technology and applications**. Prof. Igor Peshko, editor, InTech, p.143-174. 2012.

- SANTANA, T. D. **Efeito da texturização de ferramentas de corte de metal duro no torneamento, abordando: esforços de corte, sustentabilidade, desvios de forma e rugosidade**. 2022. 101 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção) - Curso de Engenharia - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.
- SHANG, X.; ZHANG, R.; MA, P. Analysis of avalanche mechanisms in short-pulses laser-induced damage. **Optics & Laser Technology**, v. 42, n. 1, p. 243-246, 2010.
- SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- SHIPWAY, P. H.; HODGE, C. J. B. Microabrasion of glass - the critical role of ridge formation. **Wear**, v. 237, p. 90-97, 2000.
- SHUM, P. W.; ZHOU, Z. F.; LI, K. Y. Investigation of the tribological properties of the different textured DLC coatings under reciprocating lubricated conditions. **Tribology International**, 65, 259–264, 2013.
- SMITH, G.T. **Advanced machining** – The handbook of cutting technology. Kempston: IFS Publications, 1989.
- STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. **Laser Material Processing**. London: Springer London, 2010.
- STOETERAU, L. R.; JANSSEN, A.; MALLMANN, G. **Analysis of dimple textured surfaces on cutting tools**. Springer. São Paulo, v.39, p. 3989–3996, 2017.
- SONG J.H.; EDIRISINGHE M.J.; EVANS, J.R.G. **Formulation and multilayer jet printing of ceramic inks**, J Am. Ceram. Soc. v. 82, p. 3374–3380, 1999.
- SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns. **Precision Engineering**, v. 33, p. 425-429, 2009.
- SZURDAK, A.; ROSENKRANZ, A.; GACHOT, C.; HIRT, G.; MÜCKLICH, F. Manufacturing and Tribological Investigation of Hot Micro-Coined Lubrication Pockets. **Key Engineering Materials**, 611-612, 417–424, 2014
- TECHSCIRESEARCH. **Techsciresearch**, mar. 2021. Global Metal Cutting Tools Market By Material (Carbide; Ceramics; CBN & PCD; Others), By Process (Milling; Turning; Drilling; Rotary; Others), By End-Use (Automotive; Aerospace & Defense; Energy; Others), By Region, Competition, Forecast & Opportunities, 2026. Disponível em: <<https://www.techsciresearch.com/report/metal-cutting-tools-market/3990.html>>. Acesso em: 10 de nov. 2022.
- THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B46:2002** Surface texture (surface roughness, waviness, and lay).
- THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Y14.5:2018** Dimensioning and tolerancing.
- TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4th ed. Butterworth–Heinemann, Boston, 2000.
- TREZONA, R.I., ALLSOPP D.N., HUTCHINGS I.M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. **Elsevier Science**, 1999.
- WANG, X.C.; ZHENG, H.Y.; CHU, P.L.; TAN, J.L.; TEH, K.M.; LIU, T.; ANG, B.C.Y.; TAY, G.H. High Quality Femtosecond Laser Cutting of Alumina Substrates. **Optics and Laser in Engineering**, Vol. 48, p. 657-663, 2010.
- XIE, J.; LUO, M.J.; WU, K.K.; YANG, L.F.; LI, D.H. Experimental study on cutting temperature and cutting force in dry turning of titanium alloy using a non-coated micro-grooved tool. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 73, p. 25–36, 2013.
- YAHYA, N.A.; TODD, R.I. Influence of C doping on the fracture mode and abrasive wear of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. **Journal of the European Ceramic Society**, V. 32, p. 4003- 4007, 2012.
- YOUQIANG, X.; DENG, J.; FENG, X.; YU, S. Effect of laser surface texturing on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiC ceramic sliding against steel under dry friction. **Materials and Design**. v. 52, p. 234-245, 2013.

YOUQIANG, X.; DENG, J.; ZHAO, J.; ZHANG, G.; ZHANG, K. Cutting performance and wear mechanism of nanoscale and microscale textured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC ceramic tools in dry cutting of hardened steel. **Journal of Refractory Metals and Hard Materials**. v. 43, p. 46-58, 2014.

ZOREV, N. M. Interrelationship between shear processes occurring along tool face and on shear plane in metal cutting. **Proc. Int. Prod. Eng. Res. Conf.**, Pittsburgh. p. 42-49, 1963.