

TAMIRES ISABELA MESQUITA BOTELHO

**AVALIAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS UTILIZADOS
COMO FLUIDOS DE CORTE NO PROCESSO DE
MICROFRESAMENTO DO AÇO FERRAMENTA ABNT
H13**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2024

TAMIRES ISABELA MESQUITA BOTELHO

**AVALIAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS UTILIZADOS
COMO FLUIDOS DE CORTE NO PROCESSO DE
MICROFRESAMENTO DO AÇO FERRAMENTA ABNT
H13**

Tese apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção de do título de **DOUTORA EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Uberlândia – MG

2024

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

B748 Botelho, Tamires Isabela Mesquita, 1990-
2024 Avaliação de Óleos Vegetais como Fluido de Corte no
Processo de Microfresamento do Aço Ferramenta ABNT H13
[recurso eletrônico] / Tamires Isabela Mesquita Botelho.
- 2024.

Orientadora: Márcio Bacci da Silva.

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

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.725>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Silva, Márcio Bacci da,
1964-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



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

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

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



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, número 390, PPGEM				
Data:	09/12/2024	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	18:00
Matrícula do Discente:	12013EMC017				
Nome do Discente:	Tamires Isabela Mesquita Botelho				
Título do Trabalho:	AVALIAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS UTILIZADOS COMO FLUIDOS DE CORTE NO PROCESSO DE MICROFRESAMENTO DO AÇO FERRAMENTA ABNT H13				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Investigação do microfresamento do aço ferramenta H13 obtido pelo processo de manufatura aditiva DED				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Rosemar Batista da Silva - FEMEC/UFU; Washington Martins da Silva Júnior - FEMEC/UFU; Déborah de Oliveira - UnB; Paulo Sérgio Martins - UNA e Márcio Bacci da Silva - FEMEC/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Márcio Bacci da Silva, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu a Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

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

Aprovada.

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

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

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



Documento assinado eletronicamente por **Déborah de Oliveira, Usuário Externo**, em 13/12/2024, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/12/2024, às 10:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/12/2024, às 13:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/12/2024, às 14:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Sérgio Martins, Usuário Externo**, em 13/12/2024, às 16:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5962280** e o código CRC **1F010BA2**.

“Se quiser triunfar na vida, faça da perseverança a sua melhor amiga; da experiência, o seu conselheiro; da prudência, o seu irmão mais velho; e da esperança, o seu anjo da guarda” (Joseph Addison).

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, pelo dom da vida, pela proteção divina, pelo amparo e por todas as graças recebidas. A minha mãe Nazaré Mesquita, por ter me ensinado a viver, mesmo com todas as dificuldades encontradas de forma digna.

Dedico esta pesquisa ao meu pai José Botelho (*in memoriam*), que tendo sua formação como torneiro mecânico foi meu maior incentivador desde o início da minha carreira, sua partida no dia 26/08/2024 será lembrada eternamente.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Márcio Bacci, sem ele essa pesquisa não seria possível, pela confiança, disponibilidade e oportunidade no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os integrantes do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), a Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) e Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), pela oportunidade concedida no desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos amigos do LEPU, Walter, Samuel, Arthur, Rahul Davis, Lucas, Thaise, Julia, Igor, Letícia, Thiago pelo apoio e amizade.

Ao professor Rosemar da Silva pelos ensinamentos, incentivos durante todo o projeto. Suas palavras motivacionais e fé foram combustíveis que me ajudaram grandemente.

Aos técnicos de laboratório, Alcione dos Reis, Thiago Pereira e Thiago Menezes, por todo auxílio, que de maneira prestativa, me ajudaram sempre que necessário.

Às agências de fomento à pesquisa e pós-graduação CAPES, CNPq e FAPEMIG, por todo apoio financeiro e bolsa de estudo.

A todos que direta ou indiretamente, colaboraram para a conclusão deste trabalho, muito obrigado.

BOTELHO, T.I.M. Avaliação De Óleos Vegetais Como Fluido De Corte No Processo De Microfresamento Do Aço Ferramenta ABNT H13. 2024, 130p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia – MG.

RESUMO

O uso de óleos vegetais como fluidos de corte tem recebido crescente atenção devido à busca por alternativas mais sustentáveis e menos agressivas ao meio ambiente na indústria metalmeccânica. Este estudo se concentra na avaliação do desempenho dos óleos vegetais da Copaíba e da Andiroba em operações de microfresamento no aço H13. Investigou-se a influência desses óleos vegetais, comparou-se com a condição a seco e com dois outros fluidos de corte comerciais. Para a execução dos ensaios experimentais foi utilizada uma microfresadora CNC e microfresas com diâmetro nominal de 400 μm . Os parâmetros de corte foram constantes ($v_c = 50,2 \text{ m/min}$ / $f_z = 5 \text{ }\mu\text{m/volta/aresta}$ / $a_p = 40 \text{ }\mu\text{m}$). Utilizou-se a técnica de aplicação de fluido por MQL, com aplicação do fluido em duas direções diferentes, na mesma direção do avanço da ferramenta e na direção contrária. Os parâmetros de saída utilizados para avaliar o desempenho dos fluidos de corte foram: rugosidade da superfície usinada, desgaste das microfresas e formação de rebarbas. O desgaste foi medido através da redução do diâmetro das microfresas. As rebarbas foram quantificadas utilizando uma metodologia desenvolvida no laboratório baseado na literatura. Também foram feitas a caracterização físico-química dos fluidos utilizados, análise de condutividade térmica, molhabilidade e ensaios tribológicos. Foram obtidas rugosidades (R_a) entre 0,05 a 0,11 μm para todos os fluidos de corte. O desgaste das microferramentas variou na faixa de 4,0 a 13 μm , com o fluido aplicado na mesma direção de avanço da ferramenta, sendo o desgaste menor com aplicação dos óleos vegetais da Andiroba e Copaíba. A forma de desgaste mais evidente foi de flanco para todas as condições. A condição a seco gerou as maiores rebarbas e as menores foram obtidas quando se aplicou os óleos da Copaíba.

Palavras-Chave: Microusinagem, Fluido de Corte, H13, Óleo Vegetal da Copaíba e Óleo Vegetal da Andiroba.

ABSTRACT

The use of vegetable oils as cutting fluids has received increasing attention due to the search for more sustainable and environmentally friendly alternatives in the metalworking industry. This study focuses on evaluating the performance of Copaíba and Andiroba vegetable oils in micro-milling operations on H13 steel, a common material in industrial applications. The influence of these vegetable oils was investigated and compared with dry conditions and other commercial cutting fluids (Quimatic and Vascomill). To carry out the experimental tests, a four-axis CNC micromilling machine and micromills with a nominal diameter of 400 μm were used, the cutting parameters were constant ($V_c = 50.2 \text{ m/min}$ / $f_z = 5 \text{ }\mu\text{m/tooth}$ / $A_p = 40 \text{ }\mu\text{m}$), with the change in the direction of the nozzle opposite to the advance and in the same direction, the output parameters were: analysis of the machined surface through roughness, to evaluate the wear of the micromills, it was measured by reducing the diameter, the burrs were quantified using a methodology developed in this research. In addition, physical-chemical characterization, thermal conductivity, wettability and tribological analysis of all cutting fluids were carried out. In the results obtained, (R_a) was found to be between 0.05 and 0.11 μm , with all cutting fluids having close but significant values. In the wear of microtools, with the absolute reduction of the tool diameter values between 4.0 and 13 μm , with the nozzle in the same direction of advancement having less wear with the application of andiroba and copaíba vegetable oils, respectively. The most evident wear mechanism was on the flank for all conditions. In relation to the resulting burrs, the dry condition generated larger burrs regardless of the direction of the nozzle, with copaíba oil obtaining the smallest burrs.

Keywords: Micromachining, Cutting Fluid, H13, Copaíba Vegetable Oil and Andiroba Vegetable Oil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1: Representação da aresta de corte na (a) usinagem convencional e na (b) microusinagem.....	8
Figura 3.2: Processo de formação de cavacos no microfresamento em um único corte.....	10
Figura 3.3: Energia específica de corte em função do avanço por dente $V_c = 40, 80$ e 120 m/min.....	12
Figura 3.4: Comparação entre o tamanho de grão do material da peça e diâmetro da ferramenta no fresamento convencional e microfresamento.....	13
Figura 3.5: As microestruturas do aço H13 com presença de carbonetos esferoidizados (a) e contorno de grão austenítico muito maior temperado a 950°C (b).....	16
Figura 3.6: Imagens do MEV do acabamento superficial e formação de rebarbas com a taxa de fluxo a $40,7$ (a) e 270 (b) ml/h.....	21
Figura 3.7: Comparação das imagens pelo MEV da formação de rebarbas do lado concordante e discordante no microfresamento a seco e por MQL do Inconel 718 em diferentes avanços.....	22
Figura 3.8: Tipos de desgaste presentes no microfresamento.....	23
Figura 3.9: Imagens do MEV do topo da ferramenta para medição do desgaste na superfície de folga através da aresta de corte.....	27
Figura 3.10: Imagens do MEV do topo da ferramenta para medição do desgaste (a) e mecanismo de desgaste encontrado (b).....	28
Figura 3.11: Imagens do MEV do topo da ferramenta para medição do desgaste (a) e mecanismo de desgaste encontrado (b).....	26
Figura 3.12: Rugosidade superficial com diferentes velocidades do fuso no microfresamento da liga Ti6Al4V.....	27
Figura 3.13: Imagens do perfil da superfície em 3D e MEV do microfresamento dos aços P20 e H13.....	29
Figura 3.14: Vista esquemática da forma e localização da rebarba no canal fresado.....	30
Figura 3.15: Vista do MEV da forma da rebarba com diferentes parâmetros de corte.....	31

Figura 3.16: Tipos de rebarbas.....	32
Figura 3.17: Rebarba do lado concordante com tipo onda do processo de microfresagem.....	33
Figura 4.1: Fluxograma das atividades desenvolvidas.....	37
Figura 4.2: Microfresadora CNC Mini-mill/GX.....	38
Figura 4.3: Montagem experimental para os ensaios (a) com o bocal com a mesma direção de avanço e (b) direção contrária.....	39
Figura 4.4: Parâmetros geométricos das microfresas com as dimensões.....	40
Figura 4.5: Microestrutura do aço H13 com presença de carbonetos esferoidizados (a) e a referência da literatura.....	41
Figura 4.6: (a) Identificação dos Fluidos de corte (1.Fluido 1 / 2.Copaíba / 3. Fluido 2 / 4. Andiroba) e o (b) viscosímetro Anton Paar, Modelo Stabinger™ SVM™.....	43
Figura 4.7: Aparato experimental para medição de condutividade térmica pelo equipamento Linseis THB1.....	44
Figura 4.8: Bancada experimental para medição do ângulo de contato dos fluidos de corte.....	45
Figura 4.9: Esclerometro Pendular, com diversos componentes.....	46
Figura 4.10: Detalhes da ponta do penetrador (a) Amostra submersa com fluido de corte (b).....	46
Figura 4.11: Microscópio Eletrônico de Varredura (a) e Perfilômetro Taylor Hobson (b).....	43
Figura 4.12: Imagens de topo (superfície secundária de folga) e a aresta de corte para avaliar a integridade das microferramentas.....	49
Figura 4.13: Representação da metodologia para medição do desgaste da ferramenta através da comparação do diâmetro inicial e final.....	50
Figura 4.14: Imagens capturadas de referência utilizadas foram no (a) início, (b) meio e (c) final do microcanal, as setas ilustram o sentido de rotação e avanço e os lados discordante e concordante.....	51
Figura 5.1: Viscosidade cinemática (a) e densidade (b) em função da temperatura para todos os fluidos de corte.....	54
Figura 5.2: Condutividade relativa para os fluidos de corte em função da temperatura.....	56

Figura 5.3: Variação do ângulo de contato no decorrer do tempo.....	57
Figura 5.4: Ângulo de contato estático em 2 segundos após o contato inicial da gota na superfície.....	58
Figura 5.5: Formato dos ângulos das gotas para os FC nos tempos de 2, 5, 20 e 30 segundos.....	59
Figura 5.6: Energia Específica consumida nas amostras do Aço Ferramenta H13 submersas nos fluidos de corte.....	62
Figura 5.7: Vista superior e detalhe da borda do risco produzido com Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c), Copaíba (d) e a Seco (e).....	63
Figura 5.8: Vista do cavaco gerado com os fluidos: Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c), copaíba (d) e a Seco (e).....	65
Figura 5.9: Rugosidade Superficial Ra (a) e Rq (b) ao longo do comprimento usinado para cada fluido de corte.....	68
Figura 5.10: Rugosidade Superficial Rt(a) e Rz(b) ao longo do comprimento usinado para cada fluido de corte.....	70
Figura 5.11: Rugosidade Superficial Rsk(a) e Rku(b) ao longo do comprimento usinado para cada fluido de corte.....	71
Figura 5.12: Rugosidade Superficial Ra (a) e Rq (b) ao longo do comprimento usinado para cada fluido de corte.....	73
Figura 5.13: Rugosidade Superficial Rz(a) e Rt(b) ao longo do comprimento usinado para cada fluido de corte.....	75
Figura 5.14: Rugosidade Superficial Rsk(a) e Rku(b) ao longo do comprimento usinado para cada fluido de corte.....	76
Figura 5.15: Influência estatística dos parâmetros de rugosidade ao longo do comprimento usinado.....	78
Figura 5.16: Resultado de desgaste médio e percentual de redução para as diferentes condições com o bocal na direção contrária ao avanço.....	79
Figura 5.17: Imagens de topo novas e usinadas após 100 mm de comprimento usinado de teste e réplica com os Fluidos de Corte (FC): Fluido 1, Fluido 2, Andiroba, Copaíba e a Seco.....	80
FIGURA 5.18. Resultado de desgaste médio e percentual de redução para as diferentes condições com o bocal na direção contrária ao avanço.....	81

Figura 5.19: Imagens obtidas pelo MEV da superfície secundária, primária de folga e superfície de saída após 100 mm de comprimento usinado com aplicação: Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c) e a Copaíba (d).....	84
Figura 5.20: Imagens obtidas pelo MEV da superfície secundária e principal de folga após 100 mm de comprimento usinado à Seco.....	85
Figura 5.21: Imagens obtidas pelo MEV da superfície secundária, primária de folga e superfície de saída após 100 mm de comprimento usinado com aplicação: Fluido 1, Fluido 2, Andiroba e Copaíba.....	86
FIGURA 5.22: Resultado de desgaste médio e percentual de redução para as diferentes condições com o bocal na mesma direção de avanço.....	87
Figura 5.23: Quantidade de rebarbas de topo para os Fluidos de Corte: Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c), Copaíba e A Seco (e).....	89
Figura 5.24: Quantidade de rebarbas por comprimento usinado para os Fluidos de Corte: Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c), Copaíba e A Seco (e).....	90
FIGURA 5.25: Quantidade de rebarbas por comprimento usinado para os Fluidos de Corte: Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c), Copaíba e Seco (e).....	93
Figura 5.26: Quantidade de rebarbas por comprimento usinado para todos os Fluidos de Corte para o lado concordante.....	94
Figura 5.27: Rebarbas nos canais após ensaios realizados com diferentes fluidos de corte.....	98
Figura 5.28: Rebarbas do tipo primária nos canais após ensaios realizados com diferentes fluidos de corte, a seta preta indica a rebarba em forma de pena.....	99
Figura 5.29: Rebarbas formadas na microusinagem A Seco do aço H13.....	99
Figura 5. 30: Quantidade de rebarbas de topo para os Fluidos de Corte.....	100
FIGURA 5.31: Quantidade de rebarbas por comprimento usinado para os Fluidos de Corte: Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c) e Copaíba (d).....	102
FIGURA 5.32: Quantidade de rebarbas por comprimento usinado para todos os Fluidos de Corte para o lado concordante.....	103

FIGURA 5.33: Rebarbas nos canais após ensaios realizados com diferentes fluidos de corte.....	106
FIGURA 5.34: Rebarbas do tipo primária e pena encontradas nos canais após ensaios realizados com diferentes fluidos de corte.....	107
FIGURA 5.35: Influência estatística na formação da rebarba ao longo do comprimento usinado.....	108
FIGURA 5.36: Influência estatística na formação da rebarba em relação à direção do bocal.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Classificação AISI de aços ferramentas para trabalho a quente.....	15
Tabela 3. 2: Composição química do AISI H13 comparada com a literatura de acordo com MetalsHandbook.....	16
Tabela 4.1: Planejamento dos ensaios.....	33
Tabela 4.2: Composição química do AISI H13 obtida por espectroscopia de emissão ótica.....	35
Tabela 4.3: Propriedades física e química dos fluidos de corte, segundo o fabricante.....	36
Tabela 5.1: Valores obtidos no ensaio de viscosidade dinâmica (μ), cinemática (ν) e densidade (ρ).....	47
Tabela 5.2: Ranque dos valores das propriedades química-física dos fluidos de corte.....	66
Tabela 5.3: Resultados da ANOVA para a rugosidade superficial.....	77
Tabela 5.4: Resultados da ANOVA para as áreas de rebarba do lado concordante.....	107

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLO

ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_e–Penetração de Trabalho
AISI–American Iron and Steel Institute
(Al, Ti)N – Nitreto de titânio e alumínio
ANOVA – Análise de Variância
ap– Profundidade de Corte
APC – Aresta Postiça de Corte
ASTM - *American Society for Testing and Material*
CNC–Comando Numérico Computadorizado
cc – Comprimento de Usinagem
d – Diâmetro de Corte da Microfresa (diâmetro da cabeça)
DC–Diâmetro de Corte
DCON –Diâmetro da Haste
DIN – *Deutsches Institut für Normung*
EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva
fz – Avanço por Dente
h – Espessura de Corte
H – Comprimento de Corte da Microfresa
H₁ – Hipótese Nula na Análise de Variância
hm- Espessura Mínima de Corte
H₀ – Hipótese Nulla na Análise de Variância
ISO – *International Organization for Standardization*
L – Comprimento Total da Microfresa
Lc – Comprimento de Corte da Microfresa
LEPU – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura
MQF – Mínima Quantidade de Fluido
MQL – Mínima Quantidade de Lubrificante
NBR – Norma Brasileira
Ra – Desvio Aritmético Médio
r_e – Raio de Ponta
Rt – Altura Total do Perfil
r_β – Raio de Aresta
SAE – *Society of Automotive Engineers*
TiCN – Carbonitreto de Titênio
TiN – Nitreto de Titânio
Vc – Velocidade de Corte
Vf- Velocidade de Avanço

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.2. Justificativa.....	2
2. OBJETIVO.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 MICROUSINAGEM.....	5
3.2 PROCESSO DE MICROFRESAMENTO.....	6
3.3. EFEITO ESCALA.....	7
3.3.1. Raio da Aresta de Corte.....	8
3.3.2. Energia Específica de Corte.....	11
3.2.3. Microestrutura do Material.....	12
3.4. AÇO FERRAMENTA AISI H13.....	13
3.5. FLUIDOS DE CORTE E SEUS IMPACTOS.....	16
3.5.1 Óleo Vegetal da Copaíba e Andiroba.....	17
3.6. MQL NO MICROFRESAMENTO.....	19
3.6.1 Aplicações de Fluidos de Corte Vegetais em Microfresamento.....	21
3.7. DESGASTE DE MICROFERRAMENTA.....	23
3.8. QUALIDADE SUPERFICIAL NA MICROUSINAGEM.....	28
3.9. FORMAÇÃO DE REBARBA NA MICROUSINAGEM.....	30
4. METODOLOGIA.....	36
4.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	37
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	39
4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE.....	41
4.3.1 Caracterização para Análise da Viscosidade e Densidade.....	42
4.3.2 Caracterização para Análise da Condutividade Térmica dos Fluidos	43
4.3.3 Caracterização para Análise da Molhabilidade dos Fluidos.....	44
4.3.4. Caracterização para Análise de Esclerometria Pendular dos Fluidos.....	45
4.4 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE.....	47
4.5 ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA.....	48

4.6 ANÁLISE E MEDIÇÃO DA REBARBA.....	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS.....	52
5.1.1 Viscosidade e Densidade.....	52
5.1.2 Condutividade Térmica.....	55
5.1.3 Molhabilidade dos Fluidos de Corte.....	56
5.1.4 Resultados dos Ensaios de Esclerometria Pendular.....	60
5.2. ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL.....	66
5.2.1. Fluido Aplicado na Direção Contrária à Direção de Avanço da Ferramenta.....	66
5.2.2 Fluido Aplicado na Direção de Avanço da Ferramenta.....	71
5.3. DESGASTE DA FERRAMENTA.....	79
5.3.1. Desgaste da Ferramenta com Aplicação do Fluido de Corte na Direção Contrária à Direção de Avanço.....	79
5.3.2. Desgaste da Ferramenta com Aplicação de Fluido na Direção de Avanço.....	85
5.4. FORMAÇÃO DE REBARBAS.....	89
5.4.1. Rebarbas formadas quando o fluido de corte é aplicado na direção contrária à direção de Avanço.....	90
5.4.2. Rebarbas formadas quando o fluido de corte é aplicado na mesma direção de Avanço.....	100
6. CONCLUSÕES.....	110
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve um notável aumento na demanda por maior qualidade em peças mecânicas, acompanhado por uma forte pressão para redução de energia e custos durante sua produção (ONLER et al., 2019). A tendência pela miniaturização de componentes mecânicos está em expansão, especialmente em áreas como aeronáutica, aeroespacial, automotiva, médica, odontológica e de telecomunicações (VAZQUEZ et al., 2015 e ABENI et al., 2019). Os principais processos de microusinagem mecânica empregando ferramenta de geometria definida são: microtorneamento, microfuração e microfresamento, com destaque maior ao último, em função da capacidade de fabricação de peças complexas (SOUSA, 2019).

O microfresamento de topo é um processo de microusinagem versátil e econômico usado para fabricar microprodutos com alta precisão dimensional e baixo custo. Envolve o uso de micro fresas de topo de diâmetros menores do que 1,000 mm e, portanto, altas rotações para garantir uma velocidade de corte adequada. Este processo tem grandes desafios, como garantir uma vida de ferramenta adequada, rugosidade superficial submicrons e pequenas rebarbas. Os parâmetros de corte, fluido de corte e geometria da ferramenta tem um impacto significativo nestes fatores (ABENI et al., 2022). Dentre a aplicação na indústria metal mecânica, destaca-se o microfresamento de aços ferramenta, em particular o AISI H13, utilizado na fabricação de moldes, matrizes e componentes de máquinas, seja para trabalho a quente ou a frio (LI et al., 2018). O aço H13 apresenta alta resistência à temperatura elevadas, boa resistência à corrosão, alta dureza e boa resistência ao desgaste (CHIAVERINI, 1988; GABARDO, 2008).

Ao realizar a microusinagem de metais, os fluidos de corte exercem múltiplas funções: eles proporcionam resfriamento tanto para a ferramenta quanto para a peça, reduz o atrito, protegem a peça contra a oxidação, facilitam a remoção do cavaco e melhora o acabamento superficial. (SARKAR & DATTA, 2020). Assim, a escolha de um fluido de corte depende de muitos fatores e afetam a usinabilidade de um material.

Dentre os tipos de aplicações dos fluidos de corte no microfresamento têm-se a técnica MQL (mínima quantidade de lubrificante), que surge como uma alternativa adequada. No MQL, uma quantidade relativamente pequena (normalmente 10–100 ml/h) de fluido de corte é aplicada sobre a zona de corte junto com ar pressurizado na

forma de névoa ar-óleo (JI, 2023). Isto garante que o fluido seja aplicado com uma velocidade alta possibilitando que atinja a zona de corte, pois a alta rotação da ferramenta pode impedir a penetração de fluido de corte devido a força centrífuga. A aplicação por MQL também fornece uma solução econômica e ecologicamente correta de refrigeração/lubrificação, pois utiliza menor quantidade de óleo. Apesar de menos toxicidade, respeito ao meio ambiente (biodegradável) e custo-benefício, o uso de MQL possui desvantagens, onde a principal é o nível de partículas em suspensão no ar, gerando uma névoa de óleo no entorno do processo de usinagem, efeito considerado indesejável, pois esse particulado pode ser inalado, podendo impactar a saúde do operador, causando problemas respiratórios (JABBAR et al., 2018) e dermatológicos (BEAUCHAM et al., 2018). Por isso atualmente é dada relevância para pesquisas que investigam fluidos de corte de baixo nível de toxidade, como acontece com fluídos de origem vegetal disponíveis na natureza. Óleos vegetais, como o óleo de canola por exemplo, tem sido investigados com sucesso como alternativa para fluidos de corte (NI et al., 2021; AIRAO et al., 2022).

Dessa forma, esta pesquisa visa mostrar a viabilidade da utilização do óleo da andiroba e da copaíba como fluido de corte no processo de microfresamento do aço H13 quando comparado com a aplicação de outros fluidos de corte comerciais de base sintética e vegetal.

1.2. Justificativa

Os fenômenos envolvidos no processo de microfresagem ainda são pouco estudados. A influência das diferentes formas de aplicação dos fluidos de corte, dos parâmetros de processo como velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e da ferramenta ainda precisam ser melhor avaliados para uma utilização mais adequada do processo (GOMES, et al, 2022; ZIBEROV et al., 2020).

Dessa forma, as vantagens que um fluido de corte oferece nos processos de microusinagem, os custos associados, os riscos para a saúde dos operadores e o impacto ambiental representam alguns dos desafios na sua utilização. Além das funções convencionais de lubrificação e resfriamento, o fluido auxilia na remoção dos cavacos gerados durante o processo. Uma alternativa para mitigar os impactos de um fluido de corte é adotar a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL), na

qual uma pequena quantidade de óleo é aplicada e pulverizada na região de corte, com o intuito de lubrificar e reduzir o atrito entre a peça e a ferramenta.

A utilização de fluidos de corte que são menos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde dos operadores está se tornando uma tendência global. Em conformidade com as normas, regulamentações e leis ambientais, essa tendência tem aumentado a demanda por novos fluidos de corte que atendam a essas condições. Dentre os fluidos vegetais, os óleos comestíveis (canola, algodão, girassol, milho e soja) têm sido investigados em processos que necessitam de lubrificação (ARAUJO JUNIOR, 2013). No entanto, existem outros óleos menos conhecidos e que podem ser uma opção para a microusinagem. Este trabalho vai investigar a viabilidade do óleo vegetal da andiroba e da copaíba, conhecidos na literatura pelos seus poderes medicinais.

A andiroba é uma árvore cujo óleo é extraído da semente tendo maior destaque entre os óleos vegetais da região norte. Este óleo agrega valores com a fabricação de cosméticos como sabonetes, xampus e repelentes além de possuir grande potencial medicinal contra edemas provocado por pancada, auxiliando na diminuição do inchaço (BOUFLEUER, 2004; SILVA et al., 2011).

O Óleo da Copaíba é conhecido a mais de 390 anos por suas propriedades medicinais. Relatos antigos mostram que índios latino-americanos o utilizavam para curar as feridas dos guerreiros após as batalhas e no corte umbilical de recém-nascidos. Também é relatado que, de forma instintiva, animais de grande porte se coçavam nas árvores de Copaíba em busca de obter uma melhor cicatrização de feridas externas (PIERI, et al., 2009). Este óleo é conhecido pela ação cicatrizante (BOMJARDIM, et al. 2020), antibacteriana (ZIECH, et al. 2013) e antifúngicas (Nakamura, et al., 2017).

Diante da importância da utilização de fluidos de corte ambientalmente corretos e menos agressivos a saúde do homem e ao meio ambiente, este trabalho utiliza o processo de microfresamento do aço ferramenta ABNT H13 para avaliar o desempenho dos óleos da andiroba e copaíba aplicados por MQL e compara com fluidos de corte comerciais de base sintética e vegetal.

2. OBJETIVO

O principal objetivo da tese consistiu em avaliar a viabilidade dos óleos vegetais puros da Andiroba e da Copaíba, utilizados como fluido de corte aplicados pela técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) na usinabilidade do aço ferramenta ABNT H13 no processo de microfresamento. O desempenho dos óleos foi avaliado através dos seguintes parâmetros:

- Qualidade da superfície usinada
- Desgaste e mecanismo de desgaste da microferramenta;
- Quantidade e formação das rebarbas

O desempenho dos dois óleos foi comparado com dois fluidos de corte comerciais. O trabalho também investigou o efeito da direção de aplicação dos fluidos de corte: na mesma direção e direção contrária ao avanço da ferramenta. Por fim, também foi realizado a caracterização físico-química, análise de condutividade térmica e molhabilidade dos fluidos além de um ensaio tribológico de cada fluido de corte utilizado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MICROUSINAGEM

A microusinagem é um processo de fabricação com características peculiares como consequência da redução da espessura de corte, profundidade de corte e, no caso de ferramentas rotativas, a redução do diâmetro. Não há uma clara delimitação que distinga a microusinagem de métodos convencionais, e a literatura contém várias interpretações e definições. Segundo Câmara et al. (2012) o microfresamento se baseia nas dimensões da ferramenta de corte, que devem estar situadas na faixa de 1 a 1000 μm .

A característica mais importante em relação ao conjunto de operações está relacionada ao fato de que a espessura do cavaco e o tamanho dos grãos do material da peça de trabalho têm dimensões semelhantes ao raio da aresta de corte, resultando no conhecido efeito de escala, que tem como principal consequência o aumento da energia específica de corte. Rodrigues & Jasinevicius (2017) complementam que no processo de microusinagem a espessura de corte está entre 5 μm e 20 μm , profundidade de corte variando de 1 μm e 100 μm , raio da aresta de corte entre 1 μm e 5 μm e tamanho do grão.

Masuzawa (2000) examina vários métodos de microusinagem e destaca características específicas em comparação com a usinagem convencional, identificando o que ele percebe como vantagens e desafios do processo mecânico em relação aos demais, são elas:

- i. Máquinas de usinagem de ultraprecisão conseguem atingir os mais altos níveis de exatidão de posicionamento.
- ii. Há uma necessidade de redução dos raios de ponta das ferramentas.
- iii. O processo não depende da condutividade elétrica da peça.
- iv. É possível controlar o tempo de usinagem, pois os processos são estáveis.
- v. Para peças muito pequenas a rigidez do material pode ser um limitante para a operação.

Apesar de o corte ser o método tradicional de usinagem, os avanços constantes na usinagem de precisão possibilitaram sua aplicação na microusinagem. Conforme indicado por resultados recentes de simulações de dinâmica molecular (MD), há a

perspectiva de redução da profundidade para 1nm. Com o alcance de níveis extremamente elevados de precisão de posicionamento em máquinas-ferramenta de ultraprecisão, a microusinagem por meio do corte tornou-se viável.

Dentro da microusinagem mecânica destacam-se atualmente os processos:

- **Microfuração:** A furação é amplamente reconhecida como o método mais comum para criar furos em processos de fabricação em larga escala. Para implementar esse método na microusinagem, é crucial resolver dois desafios significativos: a obtenção de ferramentas com dimensões micrométricas e a maior precisão de perpendicularismo do eixo árvore das máquinas ferramentas.
- **Microrretificação:** Este método tem sido extensivamente utilizado na usinagem de pinos e canais de dimensões reduzidas. A razão principal para isso reside na baixa profundidade de retificação, uma vez que o corte é executado por microgrãos. Entretanto, um desafio tecnológico surge quando o tamanho da ferramenta é extremamente pequeno, pois as dimensões dos grãos não podem ser negligenciadas, complicando a concepção de ferramentas de retificação com geometria precisa.
- **Microfresamento:** Um método de fabricação altamente flexível que viabiliza a produção de geometrias tridimensionais complexas; essa técnica, quando associada às práticas de replicação, contribui de maneira significativa para a produção em larga escala de micro e mesocomponentes. A determinação dos parâmetros de corte não pode depender exclusivamente de experiências relacionadas a problemas em macroescala, devido às limitações dimensionais do processo; em vez disso, deve ser fundamentada nos conhecimentos das forças de corte.

3.2 PROCESSO DE MICROFRESAMENTO

O processo de microfresamento destaca por sua extrema flexibilidade e versatilidade, permitindo a produção de uma ampla gama de microcomponentes altamente complexos em três dimensões, este processo compartilha de diversas características com o macrofresamento.

A redução nas dimensões envolvidas resulta em alguns fatores especialmente relacionados ao tamanho e à escala das operações, que normalmente não têm grande importância no processo convencional, passando a influenciar consideravelmente os

resultados alcançados (CHENG & HUO, 2013). Destacam-se a necessidade de maiores rotações e maior precisão de posicionamento da máquina ferramenta.

O processo de microfresamento, como qualquer processo de fabricação, é caracterizado pela interação mecânica entre uma ferramenta afiada e o material da peça. Isso resulta em cisalhamento dentro do material ao longo de planos definidos, eventualmente levando à remoção de cavacos. No entanto, no microfresamento, o raio da aresta da ferramenta desempenha um papel mais crítico do que em processos convencionais. Idealmente, o raio da aresta da ferramenta deve ser menor do que a espessura de corte, embora essa seja uma das distinções do processo. Geralmente, o raio da aresta da ferramenta não pode ser desconsiderado e tem uma dimensão comparável à espessura de corte e às vezes é até maior. Como resultado, o corte ocorre ao longo do raio de aresta, resultando em um ângulo de saída do cavaco altamente negativo. Para remover uma pequena quantidade de cavaco, no entanto, uma grande quantidade de material deve ser deformada plasticamente, resultando em um aumento nas forças de "*ploughing*" e de cisalhamento, isso resulta em uma alta energia específica de corte, muito maior do que nos processos de usinagem convencionais (CHAE et al., 2006).

Por ser uma característica importante do processo de microfresamento, o efeito escala será abordado no próximo item.

3.3 EFEITO ESCALA

Os avanços tecnológicos nos processos de usinagem têm possibilitado a remoção precisa de material e o aprimoramento do acabamento superficial em uma escala submicrométrica. Nessa precisão extrema, as investigações em microusinagem têm sido dominadas pelos efeitos de tamanho. As diferenças entre usinagem convencional e microusinagem surgem devido ao efeito escala, indicando que as reduções no processo não ocorrem de maneira uniforme (CUI et al, 2019). Isso resulta em características distintas na usinagem convencional, as quais desempenham um papel significativo na microusinagem (LIU et al., 2013; Mittal et al. 2022). A seguir, será realizada uma abordagem sobre os três principais fatores que compõem o efeito de escala, sendo eles o raio da aresta de corte, a energia específica de corte e a microestrutura do material.

3.3.1 Raio da Aresta de Corte

O raio de aresta de uma microferramenta (r_e) é comparável com a espessura de corte (h). A Figura 3.1 mostra duas ilustrações que são normalmente utilizadas para representar um processo de usinagem, o conhecido corte ortogonal. A primeira figura retrata a representação de um corte convencional, macrousinagem. Nessa representação, nota-se que a ferramenta de corte é perfeitamente afiada, e a influência do raio de aresta são desprezados, dado os parâmetros de usinagem. Assim, na representação de um corte ortogonal o raio de aresta pode ser desprezado e os ângulos de folga e saída definem a geometria do processo. Essa representação não é aplicável ao processo de microusinagem. Na segunda figura, o raio de aresta ganha relevância, tornando-se comparável à espessura de corte e ao tamanho dos grãos do material. Nesta situação o ângulo de saída efetivo pode ser muito negativo e o ângulo de folga efetivo muito pequeno. Assim, deve existir uma espessura de corte crítica e, enquanto a espessura de corte for menor do que este valor crítico, não ocorre a usinagem. Ao invés disso, ocorre apenas deformações no material, sem remoção de cavacos. Esta espessura crítica é conhecida como espessura mínima de corte. Além disso, em função do tamanho de grão do material, o cavaco pode ser gerado em apenas um ou em poucos grãos (BISSACCO, et al., 2005; ARAMCHAROEN et al., 2009 e SERJE et al., 2020) e o processo ocorre praticamente no raio de aresta.

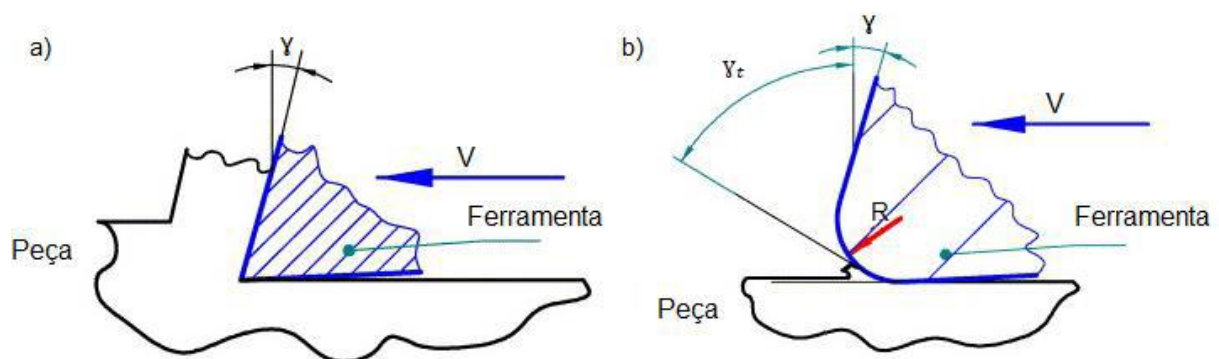


Figura 3.1: Representação da aresta de corte na (a) usinagem convencional e na (b) microusinagem (Adaptado de BISSACCO et al, 2005; ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009; SERJE, et al., 2020).

A redução substancial na razão entre a espessura de corte e o raio de aresta tem uma profunda influência sobre a energia específica de corte, formação do cavaco e integridade superficial da peça (DING, et al., 2012). O efeito na deformação do material é consideravelmente mais significativo devido ao raio de aresta, contribuindo para o efeito escala de duas maneiras principais. Quando a ação ocorre no raio da ponta, o ângulo de saída efetivo da ferramenta se torna altamente negativo. Isso resulta em uma alteração no padrão de fluxo de material ao redor da ponta da ferramenta, ampliando a zona de cisalhamento plástico e aumentando a dissipação de energia devido ao aumento do comprimento de contato entre a ferramenta e o cavaco, além do aumento do trabalho redundante, que não é utilizado para formar o cavaco. A espessura mínima de corte não depende apenas do avanço e do raio da aresta de corte, mas também das propriedades do material e da velocidade de corte. (LIU et al., 2006; LIU & MELKOTE , 2007; ZHAO, et al. 2017).

A espessura mínima do cavaco tem um impacto significativo nas forças de corte, no desgaste da ferramenta e na estabilidade do processo de microusinagem. No caso de materiais difíceis de usinar, como o cristal de carboneto de silício, a espessura crítica do cavaco não deformado diminui continuamente com o aumento da velocidade de corte (ZHIGANG, et al. 2022; GUANGZHOU et al. 2022). Sabendo que as rebarbas são causadas pela formação incompleta ou fratura incompleta dos cavacos, a relação entre espessura de corte e raio de aresta terá um efeito muito grande na formação das rebarbas. A Figura 3.2 ilustra uma operação de fresamento de topo com a penetração de trabalho igual ao diâmetro da ferramenta. Conforme mostra na figura, a formação de cavacos pode ser dividida em três estágios, incluindo estágio de deformação plástica. No lado do fresamento discordante enquanto a espessura de corte for menor que a espessura mínima, o material sofrerá deformação elástica e nenhum cavaco será formado. Quando a espessura de corte aumenta para h_{min} ou até mais, os cavacos começam a se formar e o fenômeno de recuperação de material ainda não existe. Com o aumento da espessura de corte, a deformação por cisalhamento plástico dos materiais torna-se a principal forma de deformação. No lado concordante, a espessura de corte é de forma contínua reduzida. Quando a espessura de corte reduz a um determinado valor, os cavacos quebrarão ou permanecerão no topo da ranhura. Portanto, a rebarba no lado discordante é o produto da deformação

da extrusão, e a rebarba no lado concordante é o produto da fratura incompleta dos cavacos. A figura ilustra a formação do cavaco para os três estágios.

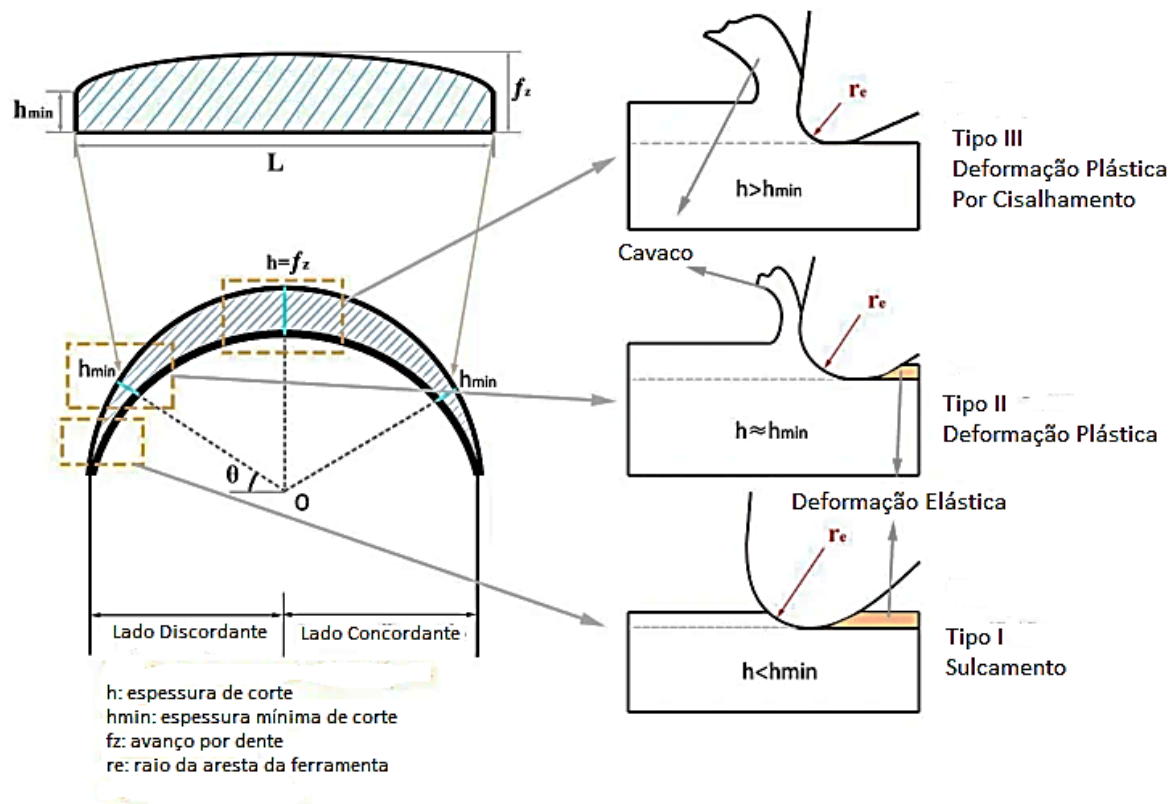


Figura 3.2. Processo de formação de cavacos no microfresamento em um único corte (adaptado de YUAN, et al. 2022).

A consideração da relação acima, referente à espessura mínima de corte, é crucial, pois o material da peça deslizará sobre a superfície de folga da ferramenta, conforme ilustrado na figura 3.2. Quando a espessura de corte (h) é inferior à espessura mínima de corte (h_{min}), não ocorrerá remoção de material. O material vai deformar e deve ocorrer uma recuperação plástica (efeito que pode ser desprezado na macrousinagem). Devido à esta recuperação elástica, ocorrerá o fenômeno conhecido como "*ploughing*", uma vez que o ângulo de saída é altamente negativo durante o processo de microusinagem (WANG et. al, 2016).

O *ploughing* (sulcamento) é um problema significativo na microusinagem, pois afeta a precisão da superfície acabada, formação de rebarbas e desgaste da ferramenta e é esse fenômeno que leva ao aumento da energia específica de corte. Vários métodos foram desenvolvidos para estudar e compreender esse mecanismo

(SHAN et al., 2017). O mesmo, também influencia a formação de cavacose o estado de tensão residual após o processamento.

Portanto, entender a espessura mínima do corte é crucial para otimizar o processo de usinagem (CUBA RAMOS et al., 2012). Além disso, o raio da aresta de corte e o tamanho do grão do material têm uma influência significativa na força de corte. A influência do tamanho do grão do material na força de corte é afetada pelo efeito duplo do raio da aresta de corte, com a força de sulcamento sendo a principal causa (XIAN WU et al., 2016; MING-CHUN, et al, 2023). Tanto na macro quanto na microusinagem, o raio da aresta de corte afeta a formação de cavacos e a força de corte, com mecanismos do efeito *ploughing* e cisalhamento envolvidos (JURI, et al., 2015).

3.3.2 Energia Específica de Corte

A energia específica de corte, definida como a energia por unidade de volume de material removido na unidade de tempo, normalmente é considerada como uma propriedade do material a ser usinado e pode ser utilizada como uma medida da usinabilidade. É interessante observar que a energia específica de corte aumenta com a diminuição da espessura de corte. E é isso que caracteriza o chamado fator escala. Ela é influenciada por vários fatores, como velocidade de corte, taxa de avanço e propriedades do material. Durante o processo de fresamento, a área instantânea do cavaco e as forças de usinagem mudam ao longo da passagem de cada aresta da ferramenta de corte, mas, no entanto, é possível calcular a energia específica média ao considerar a proporção das forças médias em relação à área média do cavaco. (FILIZ et al. 2007; CHENG & HUO, 2013).

O gráfico da figura 3.3 mostra a energia específica média versus avanço por aresta para as três velocidades de corte utilizadas no trabalho de Chae et al. (2006). Maior energia específica é relacionada a menores valores de avanço. Esta observação corresponde ao efeito escala. Este aumento se deve principalmente à recuperação elástica e ao "*ploughning*".

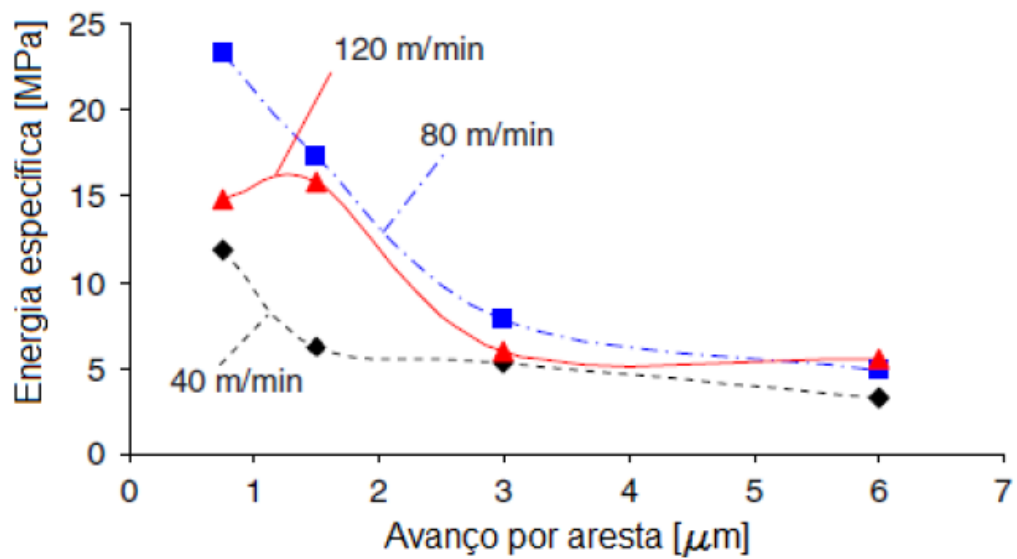


Figura 3.3. Energia específica de corte em função do avanço por dente $V_c = 40, 80$ e 120 m/min (adaptado de FILIZ et al., 2007).

3.3.3 Microestrutura do Material

Enquanto na usinagem em macro escala a formação do cavaco compreende vários grãos do material, na microusinagem os cavacos são formados por poucos ou por um único grão de cada vez (BISSACO et. al., 2005). Isso pode levar a uma maior variação das forças de corte no microfresamento. Este efeito está representado na Figura 3.4.

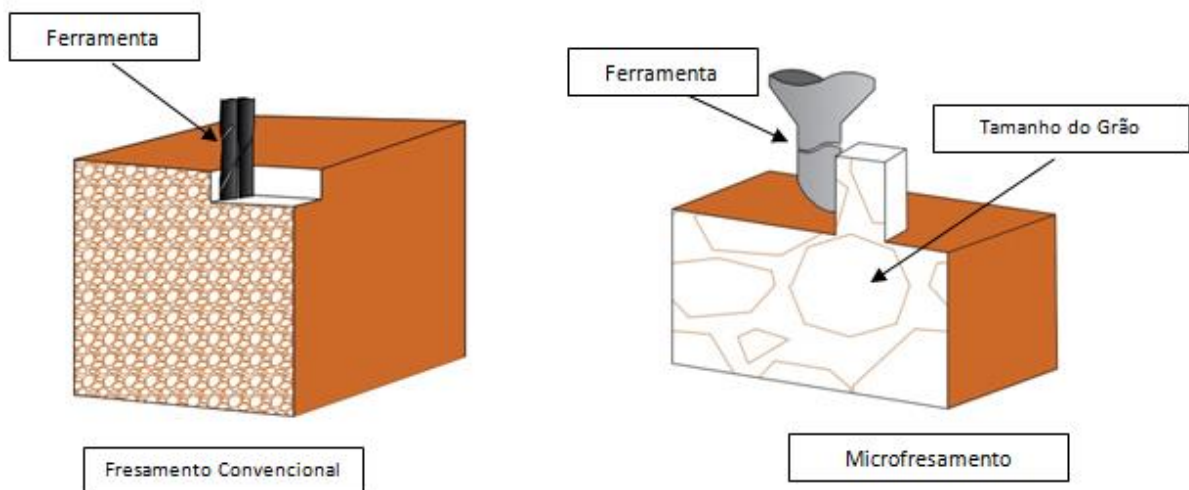


Figura 3.4: Comparação entre o tamanho de grão do material da peça e diâmetro da ferramenta no fresamento convencional e microfresamento (adaptado de CHENG & HUO, 2013; SERJE, et al., 2020).

Ribeiro, et al. (2020) avaliaram a instabilidade do corte por meio da correlação entre a emissão acústica e a rugosidade superficial no processo de microfresamento de dois aços de baixo carbono, um deles com tamanho de grão ultrafino. O autor utilizou usinagem a seco e fresas de topo de metal duro de 1 mm de diâmetro revestidas e as seguintes condições de corte: $v_c = 125$ m/min, $a_p = 100\mu\text{m}$, $f_z = 3,0\mu\text{m}$ e $a_e = 1,0\mu\text{m}$. Os resultados mostraram que a granulometria reduzida tendem a apresentar maiores valores de emissão acústica (EA). Além do corte ser mais instável, liberará mais energia, levando a níveis mais elevados de emissão acústica. No entanto, não encontrou uma correlação entre o sinal de EA e a rugosidade superficial.

3.4 Aço AISI H13 (Aço Ferramenta)

O aço ferramenta ABNT H13 faz parte da categoria de aços ferramenta da série H, caracterizados por serem ligas de médio teor de carbono, frequentemente empregados em operações de trabalho a quente devido suas excepcionais propriedades a resistência ao calor. Também é utilizado em moldes para injeção de plástico. A Tabela 3.1 apresenta a classificação e a descrição para o aço ferramenta da série H para trabalhos a quente (ASM INTERNATIONAL, 2005). Os mais amplamente comercializados incluem as variantes à base de cromo, o H11, H12 e H13. Originalmente desenvolvidos para a fundição de ligas de alumínio, esses aços destacam-se pela sua resistência à formação de trincas (GABARDO, 2008).

O H13 contém uma combinação de elementos de liga, incluindo cromo, molibdênio e vanádio, que contribuem para sua dureza, resistência ao desgaste e capacidade de manter suas propriedades em temperaturas elevadas. Essa liga é amplamente utilizada na indústria de moldagem por injeção, forjamento a quente e outras aplicações onde a resistência ao calor e a durabilidade são essenciais (CHIAVERINI, 1979; CALLISTER, 2000).

Tabela 3.1. Classificação Norma ABNT de aços ferramentas para trabalho a quente

Classificação	Símbolo	Descrição
Aços para Trabalho a Frio	H01 - H19	A base de cromo
	H20 - H39	A base de tungstênio
	H40 – H59	A base de molibdênio

Fonte: ASM INTERNATIONAL (2005)

Os aços ferramentas são classificados por meio de uma combinação de composição química, aplicação e tipos de tratamentos térmicos submetidos. Mesmo em aços ferramentas de aplicações semelhantes, as composições podem apresentar uma extensa variação, fazendo com que eles sejam classificados por meio de composição química de forma exclusiva, como no caso das classificações feitas pela SAE/ABNT (KRAUSS, 1998; CANÇADO, 2018). A Tabela 3.2 apresenta diferentes trabalhos realizados com o aço ferramenta H13 comparando a composição química de acordo com Metals Handbook (2002).

Tabela 3.2 – Composição química do AISI H13 comparada com a literatura de acordo com Metals Handbook (2002), Gabardo (2008), Diehl (2017) e Cançado (2018).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Cu	Ni	V
% do elemento de acordo com MetalsHandbook (2002)	0,32 a 0,45	0,8 a 1,2	0,2 a 0,5	-	-	4,75 a 5,5	1,1 a 1,75	-	-	-	0,8 a 1,2
% do elemento de acordo com Gabardo (2008)	0,39	1,10	0,4	0,01	-	-	1,21	-	-	0,25	0,85
% do elemento de acordo com Diehl (2017)	0,42	1,04	0,3	0,002	0,005	4,98	1,29	0,01	0,14	0,21	0,93
% do elemento de acordo com Cançado (2018)	0,39	1,07	0,38	-	-	5,46	1,26	-	-	-	0,95

Diversos trabalhos foram realizados com o aço ferramenta H13 correlacionando a microestrutura com as propriedades mecânicas por meio do tratamento térmico. Gabardo (2008) avaliou a microestrutura do aço H13 (Figura 3.5a), estando recozida e com matriz ferrítica com quantidade considerável de carbonetos secundários esferoidizados resultando em um material homogêneo com estruturas de grão muito finos. Caçando (2018) avaliou diferentes temperaturas de tratamento térmico de têmpera a 950°C e 1100°C e temperatura de revenimento de 150°C, 300°C, 450°C, 500°C, 550°C e 600°C nos aços H11 e H13, os resultados apresentaram formação de carbonetos com o aumento da temperatura de revenimento. Em aços ferramentas pode ocorrer um aumento de dureza com o aumento da temperatura, esses carbonetos presentes na estrutura final, são os que não dissolvem no processo de austenitização (COLLINS, 1996). Nota-se que quase não são vistos na microestrutura que tem um contorno de grão austenítico muito maior (Figura 3.5b). O tamanho do grão austenítico foi devido ao aumento da temperatura, uma vez que a maiores temperaturas há uma maior energia vibracional, que favorece o mecanismo difusional para que ocorra o crescimento desses grãos. A quase ausência de carbonetos está relacionada ao fato de que os carbonetos primários foram dissolvidos, ou seja, os elementos de liga e o carbono presente entraram em solução sólida na austenita.

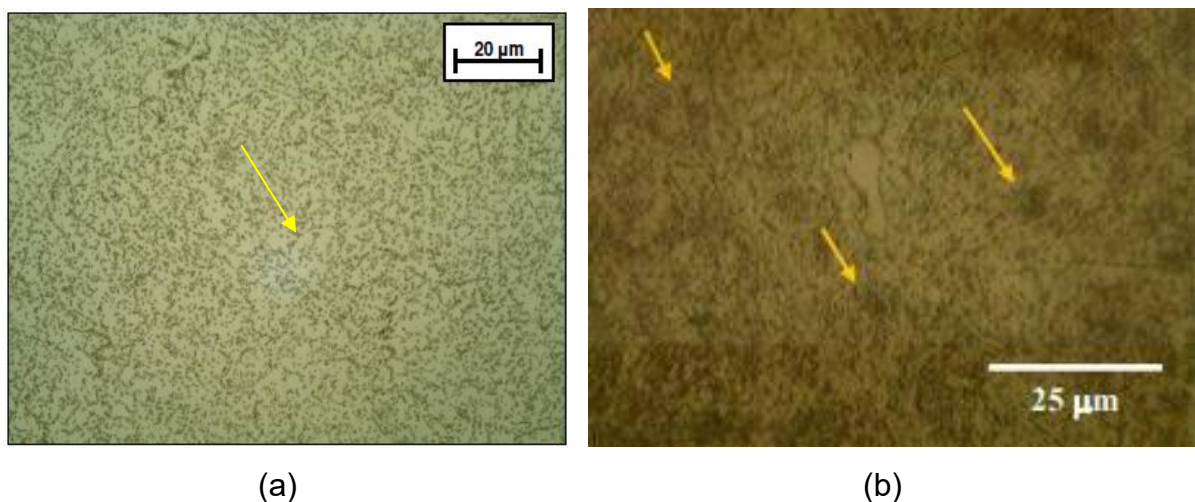


Figura 3.5: As microestruturas do aço H13 com presença de carbonetos esferoidizados (a) e contorno de grão austenítico muito maior temperado a 950°C (b), segundo GABARDO (2008) e CANÇADO (2018), respectivamente.

3.5 FLUIDOS DE CORTE E SEUS IMPACTOS

O fluido de corte desempenha diversas funções além de naturalmente refrigerar e lubrificar. Entretanto, a conscientização ambiental está em constante crescimento a cada ano, e o aumento dos desafios relacionados ao descarte, impulsionada por regulamentações mais rigorosas está compelindo um número maior de indústrias a investigar de maneira mais profunda as considerações ambientais em suas operações de produção. O emprego de fluidos de corte na usinagem torna a indústria metal-mecânica uma ameaça ao meio ambiente. Diversos problemas surgem dessa utilização, que vão desde a criação de efeitos prejudiciais ao operador até a agressão ao meio ambiente.

Devido os aditivos nos fluidos de corte, as doenças causadas tornam-se um fator extremamente prejudicial. Koller & Foulds (2020) avaliam diversas doenças derivadas dos fluidos de corte, encontrado a mais comum as doenças de pele e a dermatite de contato alérgico a mais irritante, sendo o principal responsável os biocidas. Bauer et al., (2018) cita que a dermatite ocupacional irritante nas mãos causa um grande desconforto no trabalhador, além da pele correr riscos de danos maiores devido ao contato com água, detergentes, produtos químicos ou outros agentes. Os autores concluíram que medidas preventivas como luvas de proteção, cremes de barreira e hidratantes podem reduzir o risco de desenvolverem essa doença.

Nett et al. (2021) examinaram as doenças respiratórias e cutâneas ocupacionais entre operadores expostos a fluidos durante o processo de usinagem e encontraram cinco casos de doença pulmonar grave e anteriormente não reconhecida, configurada por bronquiolite de células B e ductite alveolar com enfisema. Outra doença respiratória desenvolvida foi a pneumonite de hipersensibilidae (PH). Tustin et al. (2021) encontraram um conjunto de doenças devido o contato e contaminação microbiana e aerossolizado no processo de usinagem, presentes no ar do local de trabalho dentro de uma fábrica. Resultando em 30,8% dos operadores com problemas respiratórios. Análise de partículas suspensa no ar feita pela OSHA (administração de segurança e saúde ocupacional) detectaram concentrações de endotoxinas elevadas próximas as máquinas operatrizes de controle numérico.

No ano de 2010, aproximadamente 5,3% do total global de consumo de lubrificantes consistiu em fluidos metalúrgicos, totalizando cerca de 197 milhões de

toneladas, sendo a maior proporção derivada de óleos minerais não renováveis (GOSALIA, 2010). Assim, a utilização generalizada e em grande escala de fluidos de corte destaca a necessidade de abordar este assunto de maneira abrangente. Pekol (2018) avaliou o efeito do descarte dos fluidos de corte no processo de fresamento ao meio ambiente usando um sistema de teste *Allium Cepa*, o qual analisa as pontas de raízes de cebola. O autor encontrou um mecanismo que desencadeou anormalias cromossômicas e nucleares no meristema da ponta da raiz da cebola. Além disso, realizaram análise fluorecência de raio X e obtiveram concentrações de elementos, como silício, cálcio, ferro e zinco.

Uma das soluções para diminuir os impactos dos fluidos de corte na saúde do operador e no meio ambiente é a utilização de óleos vegetais. A seção a seguir aborda os óleos vegetais utilizados neste trabalho.

3.5.1. Óleo Vegetal da Copaíba e Andiroba

O Óleo da Copaíba é amarelo-acastanhado conhecido pela ação anti-inflamatória, cicatrizante, antibacteriano (CUNHA, et al. 2019) e antifúngicas (NAKAMURA, et al., 2017). Apesar de outros fluidos de corte serem utilizados ou investigados, como o óleo de canola por exemplo (referência), ainda é observado um baixo nível de publicações de trabalhos e pesquisa com esses dois óleos, consequência do baixo reconhecimento dessas espécies no mundo acadêmico (TOBOUTI, et al. 2017).

O Óleo de Copaíba é utilizado nas mais diversas áreas da saúde, como na dermatologia. Apresentou-se como uma excelente alternativa como potencializador na penetração de medicamentos por via cutânea na forma de creme contendo em sua composição ibuprofeno (IBU) e óleo de copaíba: IBCO5 e IBCO10 com 5% e 10% de óleo de copaíba, respectivamente (NOGUEIRA et al., 2022). Na cardiologia, pesquisadores tornaram-se referência internacional neste tema, com o efeito do óleo da copaíba como uma alternativa terapêutica para o tratamento de hipertensão pulmonar, por ser uma patologia grave de difícil tratamento e limitações (GELPI, R.J. 2021). Na odontologia, um estudo de caso de um paciente com diabetes tipo 2 que apresentou periodontite, uma doença caracterizada por inflamação nas gengivas,

após dois meses do uso do óleo da copaíba as áreas afetadas apresentaram uma melhora considerada (RAMOS-PERFECTO, et al. 2021).

A andiroba é uma espécie vegetal que tem chamado a atenção por seus potenciais aplicações em diversos campos. Pertencente a espécie *Carapa Guianenses* da família Meliaceae, predominantemente identificada na América Latina. O óleo extraído é muito utilizado nas práticas endógenas de recuperação química da biomassa de sementes oleaginosas (GIÁCOMO et al., 2017). A andirobeira, como é conhecida por grande parte dos amazônidas, é uma grande árvore comum em florestas primárias e antigas florestas secundárias, sua distribuição natural é muito ampla e constitui um grupo de plantas características das civilizações nativas da América tropical (BRITO et al., 2020).

A andiroba é uma planta muito cobiçada, devido suas propriedades medicinais para tratamento de algumas doenças como: reumatismos agudo e crônico, colesterol alto, dores musculares, dores de cabeça, sinusite, infecção dos rins e lombalgias (LEMES et al., 2017; MELO et al., 2018; MENEGUETTI et al., 2019).

Devido o alto poder lubrificante, os óleos vegetais vêm ganhando visibilidade nas pesquisas. Filho et al. (2019) realizou a avaliação da lubricidade do óleo de coco e da andiroba por ensaio de desgaste por um disco contra um bloco submetido a força constante, onde resultou em maiores taxas de desgaste dos óleos de coco babaçu se comparada com o óleo de andiroba. Na usinagem utilizando o processo de torneamento, Botelho et al. (2019) estudaram a influência da *carapa guianensis* comparada com o fluido de corte comercial no aço ABNT 1045, resultando na melhor forma de cavaco para a segurança do operador e melhor acabamento superficial, superior a 23% em relação ao fluido comercial.

Os fluidos vegetais são normalmente aplicados como fluidos de corte utilizando a técnica de MQL – mínima quantidade de lubrificante. Essa forma de aplicação de fluido também é mais adequada para os processos de microfresamento para aumentar a velocidade do fluido para permitir que ele chegue na zona de corte. Devido às altas rotações utilizadas, a força centrífuga pode impedir a penetração de fluido. Assim, o tópico a seguir trata desta forma de aplicação de fluido em particular.

3.6 MQL NO MICROFRESAMENTO

Os fluidos são aplicados nas zonas de corte, basicamente por sistemas de baixa pressão (jorro), atomização (MQL) com pressões de ar comprimido de 1 a 7 bar e sistema de alta pressão, podendo chegar a 300 bar. Todas as formas afetam diretamente a lubrificação, refrigeração e remoção do cavaco do sistema. Atualmente a aplicação por atomização de pequenas quantidades de óleo vem ganhando cada vez mais espaço em muitas pesquisas. (BALDIN et al 2023; SEN et al., 2019; MACHADO et al., 2015) No método MQL, as gotículas de óleo são transportadas com o auxílio do ar comprimido, formando uma névoa, e direcionadas nas zonas de corte. A quantidade de fluidos de corte, por sua vez, depende do processo de usinagem, com variações de 25 a 500 ml/h (DHAR, et al., 2007).

A eficiência do método MQL depende da seleção do tipo de fluido de corte, taxa de fluxo e a maneira como é aplicado exercem uma influência significativa no desempenho do mesmo. Além de impactar o processo em si, a decisão sobre o fluido e sua forma de aplicação deve levar em consideração os aspectos econômicos e ambientais.

Com relação a questões ambientais, Krolczyk et al. (2019) apresenta tendências ecológicas na usinagem com fluidos de corte com o foco na sustentabilidade e produção, como a usinagem a seco, MQL/MQCL, usinagem criogênica e óleos vegetais biodegradáveis. Para a eliminação dos impactos ambientais os óleos biodegradáveis são mais indicados, pois são menos tóxicos. Aplicados com MQL/MQCL podem contribuir para melhor eficiência e resultados ecológicos e econômicos positivos, especialmente para alumínio, níquel e ligas de titânio (SINGH et al., 2018).

Na microusinagem a técnica MQL representa uma abordagem mais eficiente e sustentável em comparação com os métodos tradicionais de lubrificação e assim, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas para verificar o desempenho de um fluido de corte. Ziberov et al. (2016a) demonstrou a impactante influência da aplicação mínima de lubrificante (MQL) ao compará-la com o método a seco. Ao analisar o desgaste de microfresas de metal duro não revestidas durante a usinagem da liga Ti-6Al-4V, constatou-se que o uso de fluido de corte proporcionou um acabamento superficial superior, atribuído à ausência de aresta postiça.

De Oliveira et al. (2020) cita a importância da taxa de fluxo na técnica MQL que terá influência na qualidade superficial e na formação de rebarbas no microfresamento

do Inconel 718. Encontrando que para taxa de fluxo com 40,7 ml/h resultou em baixa qualidade superficial, maior formação de rebarbas e menor quantidade de fluido de corte na interface ferramenta-peça, assim a taxa de fluxo mais alta de 270 ml/h foi a mais adequada em relação à qualidade superficial e formação de rebarbas, Figura 3.6.

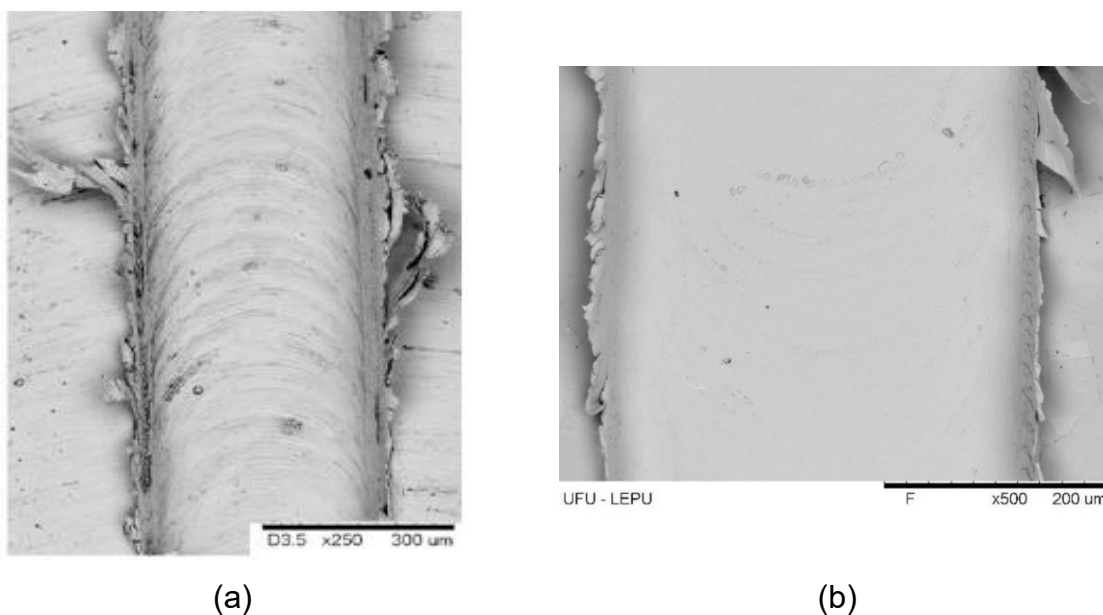


Figura 3.6: Imagens do MEV do acabamento superficial e formação de rebarbas com a taxa de fluxo a 40,7 (a) e 270 (b) ml/h (De OLIVEIRA, et al. 2020).

Hassanpour et al. (2016) estudaram o microfresamento de liga de titânio e os resultados mostraram que o MQL melhorou a qualidade da superfície usinada. Eles afirmam que o avanço e a velocidade são os principais fatores que afetam o desempenho da usinagem. Além disso, observaram que a utilização de MQL proporcionou um aumento na vida da ferramenta e uma redução significativa na formação de aresta postiça de corte. Li et al. (2010) concluíram que a utilização de MQL teve um efeito significativo na rugosidade da superfície, no desgaste da ferramenta e na formação de rebarbas no microfresamento de aço. Eles observaram que o efeito lubrificante do óleo utilizado no sistema de MQL melhorou a vida útil da ferramenta.

Vazquez et al., (2015) avaliaram o impacto das diferentes formas de aplicação de fluido de corte no processo de microfresamento da liga Ti-6Al-4V, constatando que o método MQL é mais eficaz em comparação com as alternativas disponíveis. Os

autores destacam a ineficácia da aplicação por jato, que não alcança a zona de corte, e apontam o aspecto ambientalmente desfavorável da aplicação por inundação. A adoção do MQL resultou na redução do desgaste da ferramenta, além de proporcionar menor formação de rebarbas e melhorar as tolerâncias geométricas. Além de descobrirem que a aplicação de MQL na direção de avanço proporciona menos desgaste da ferramenta em comparação com a aplicação na direção oposta ao avanço.

3.6.1. Aplicações de Fluidos de Corte Vegetais em Microusinagem

O uso de fluidos de corte à base de óleos vegetais como alternativa aos fluidos à base de óleos minerais demonstrou potencial para reduzir o impacto ambiental e melhorar os resultados técnicos. Estudos demonstraram que a aplicação assistida por MQL de fluidos de corte vegetais pode reduzir as temperaturas de corte e aumentar a vida útil da ferramenta (BALDIN, et al. 2023; AFONSO et al., 2022). Além disso, a adição de nanoaditivos ou nanofluidos vem ganhando espaço na pesquisa, melhorando a usinabilidade e a qualidade dos produtos microfresados (CELIS et al., 2021).

Anand & Mathew, (2020) avaliaram por meio da técnica MQL o efeito do óleo de girassol no microfresamento do Inconel 718 em comparação a condição a seco. Os autores utilizaram microferramenta de 0,5 mm de diâmetro revestida de AlTiN, aplicação de fluido por MQL à taxa de 50 ml/h com os seguintes parâmetros ($n=5000$ rpm; $a_p = 100 \mu\text{m}$; avanço/dente = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 2, 3, 4,5, e 6 μm). Os resultados mostraram uma redução de quase 32% na rugosidade média, 36% na rebarba superior e na largura e 37% na altura da rebarba superior em comparação com a condição a seco. A Figura 3.7 ilustra a comparação das imagens da formação da rebarba e a qualidade superficial dos canais no microfresamento com MQL e a seco.

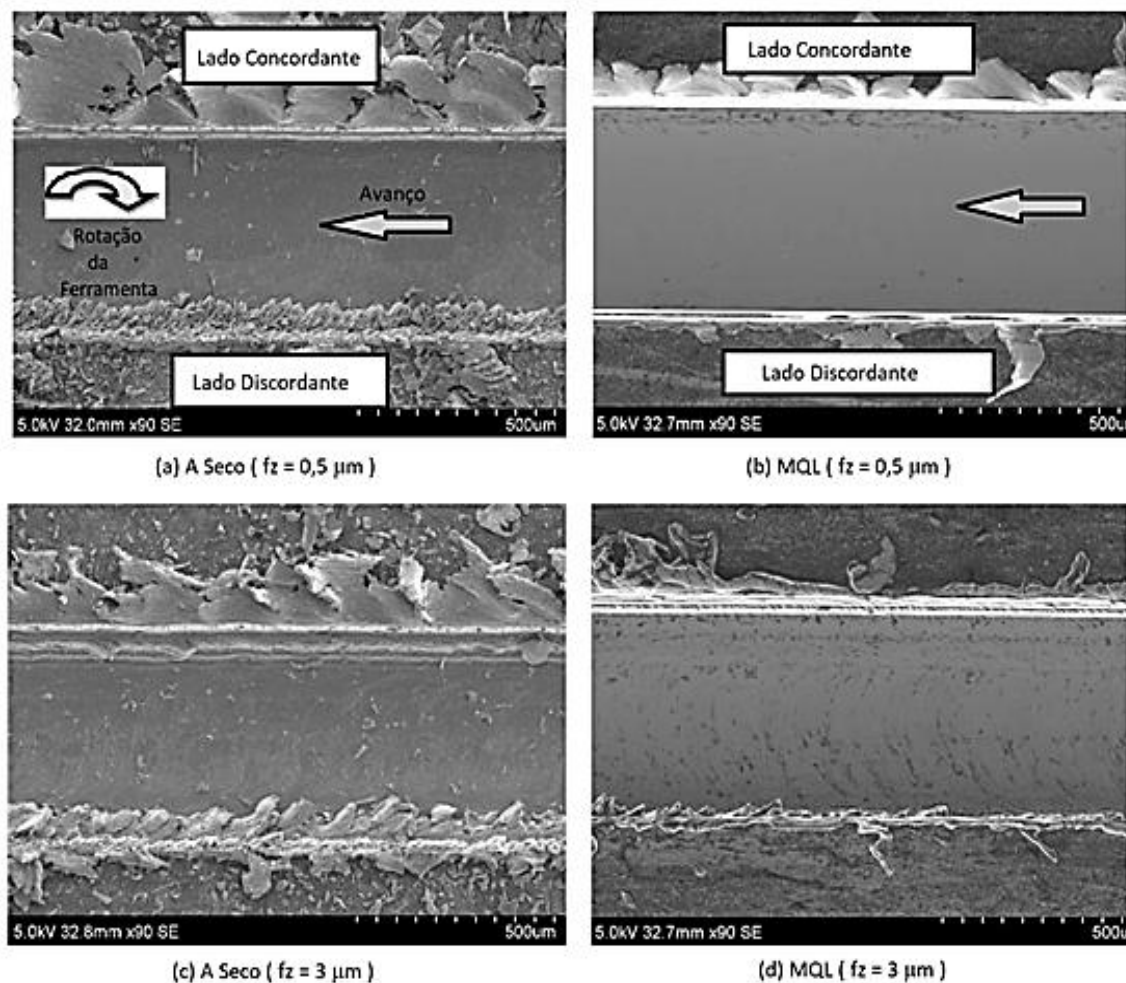


Figura 3.7: Comparação das imagens pelo MEV da formação de rebarbas do lado concordante e discordante no microfresamento a seco e por MQL do Inconel 718 em diferentes avanços (ANAND & MATHEW, 2020).

3.7. DESGASTE DE MICROFERRAMENTA

Nos processos de microusinagem, em condições normais, a baixa rigidez ocasiona um rápido desgaste da ferramenta, causando fortes vibrações e deterioração da superfície usinada. As formas de desgaste mais comuns no microfresamento, segundo Alhadeff et al. (2019), são apresentadas na Figura 3.8.

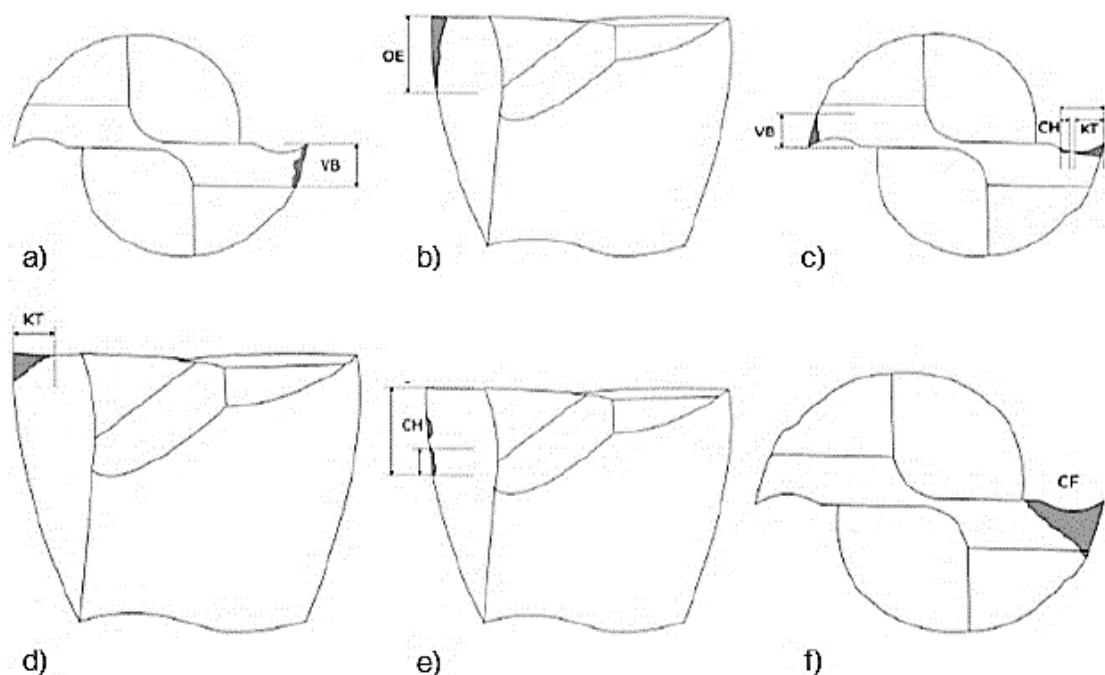


Figura 3.8: Tipos de desgaste presentes no microfresamento (adaptado ALHADEFF et al., 2019).

Observa-se na figura que os principais tipos de desgaste presente no microfresamento são: o desgaste de flanco (VB), Fig 3.8 (a) e (c); o desgaste medido na aresta principal de corte (OE), Fig. 3. 8 (b); o desgaste medido na aresta secundária de corte (KT), Fig. 3. 8 (c) e (d); o desgaste por lascamento (CH), Fig. 3. 8 (c) e (e); e a falha catastrófica (CF), Fig. 3. 8 (f).

De forma semelhante, quando se refere à usinagem, o desgaste é considerado uma perda gradual de material que segundo a ISO 3685 (1993) muda a forma original da ferramenta, durante o corte. Outro comportamento semelhante à macrofresagem em relação ao microfresamento é a evolução do desgaste. Gomes et al. (2022) realizou uma revisão, que apresentou tais comportamentos. Sendo eles, no primeiro estágio a taxa de desgaste inicial é alta e aumenta rapidamente, no segundo a taxa diminui e é quase constante. No terceiro estágio, aumenta novamente e leva a um estágio de ruptura grave, podendo ser visto na Figura 3.9 a evolução no microfresamento do aço inoxidável 316L, revestido de (Al, Ti)N a uma $V_c = 12,7$ m/min, $a_p = 40$ μ m.

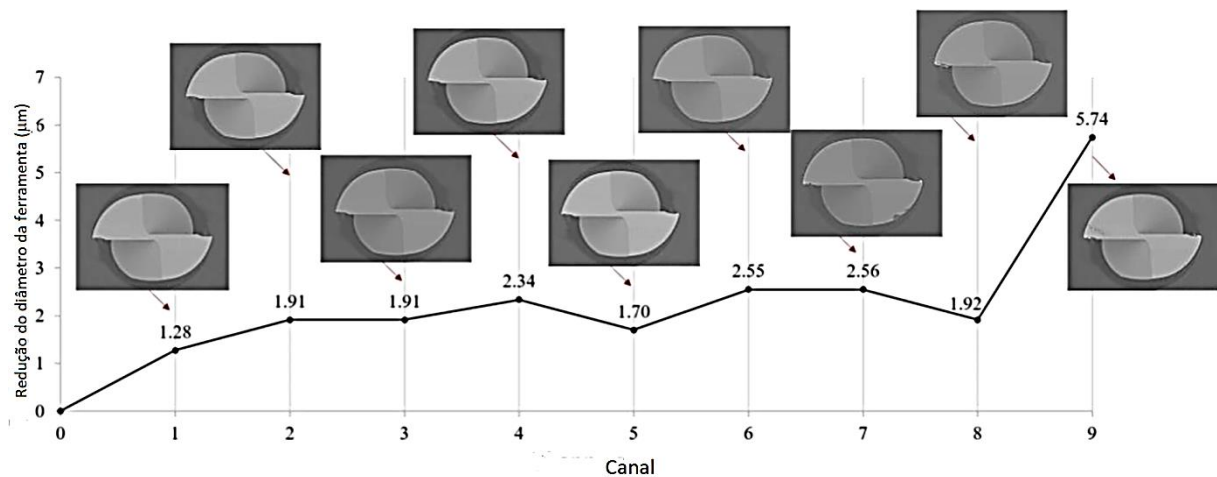


Figura 3.9. Imagens da ferramenta de topo e a evolução do desgaste (adaptado de GOMES et al, 2022).

Na microusinagem muitos trabalhos são desenvolvidos a fim de analisar o desgaste e a forma de como acontece. Isso ocorre, devido à complexidade desse processo e suas pequenas dimensões. Atualmente não existem normas ou padronização para quantificar o desgaste em microfresas e diversos autores têm usado vários métodos.

Silva & Da Silva (2019) realizaram a avaliação do desgaste na superfície secundária de folga, conforme ilustrado na Figura 3.10. No decorrer de sua pesquisa sobre microfresamento experimental com aço inoxidável duplex, empregaram ferramentas de metal duro revestidas com AlCrN, apresentando diâmetros de 0,2 mm e 0,4 mm, com variação da rotação (30.000, 40.000 e 60.000 RPM; $a_p = 40\mu\text{m}$ e $f_z = 2\mu\text{m}$). A análise do desgaste envolveu a comparação entre a ferramenta recém-adquirida e após a usinagem, sendo que as medições foram realizadas em duas posições distintas (Desgaste 1 e Desgaste 2) por meio de imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

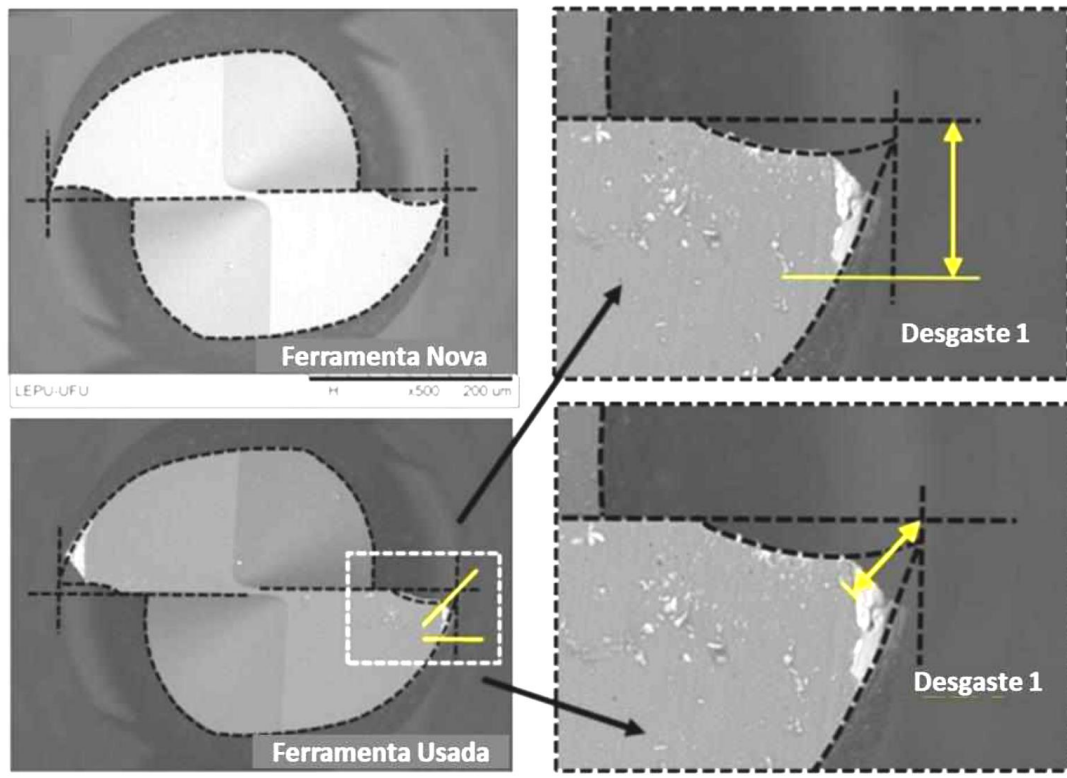


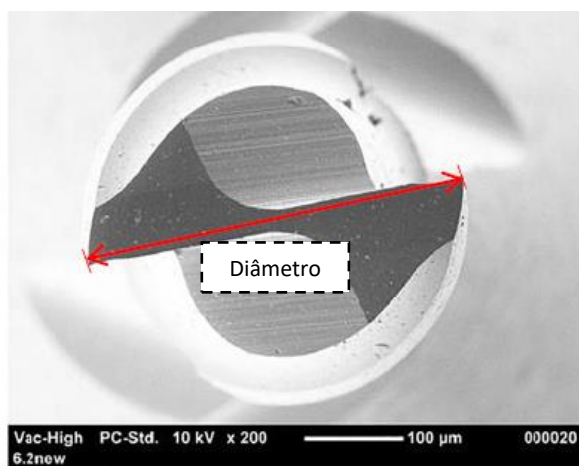
Figura 3.10. Imagens do MEV do topo da ferramenta para medição do desgaste na superfície de folga através da aresta de corte. (adaptado de SILVA & DA SILVA, 2019).

No estudo de Ziberov et al. (2020), investigou a usinabilidade da liga Ti-6Al-4V em operações de microfresagem, com condições a seco e MQL variando microfresas sem revestimento, TiAlN e DLC utilizando os seguintes parâmetro: $V_c=9,6$ (m/min); $f_z=0,1(\mu\text{m})$; $V_f= 4$ ($\mu\text{m}/\text{min}$); $a_p = 10\mu\text{m}$, $f_z = 0,1\mu\text{m}$ e $a_e = 152,4 \mu\text{m}$. Os autores mensuraram o desgaste na superfície principal de folga através de fotos realizadas no MEV da diferença entre a ponta da ferramenta nova e da ferramenta após a usinagem em posições diferentes, para a obtenção do desgaste de flanco. Os resultados mostraram que o arredondamento do raio da borda e o desgaste do flanco foram os principais tipos de desgaste. O desgaste foi predominantemente na face de folga secundária da microferramenta quando o fluido de corte foi aplicado. As microferramentas revestidas com DLC em condições secas exibiram o menor desgaste da ferramenta, com uma redução de desgaste de 640% e 267% em comparação com as microferramentas revestidas e não revestidas com TiAlN, respectivamente.

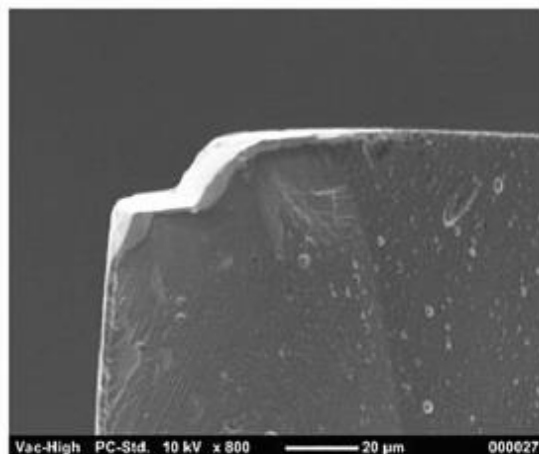
O desgaste da ferramenta também pode ser identificado pelo mecanismo físico. Os mecanismo mais comuns, são: adesão, abrasão, difusão, oxidação e

corrosão (UHLMANN et al.,2013). Li et al. (2011) descreveram os tipos de desgaste, incluindo lascamento, desgaste abrasivo e aresta postiça na usinagem de aços ferramentas H11, H13 e D2 usando ferramentas de carboneto de tungstênio revestido (TiAlN).

Chen et al. (2021) cita que o desgaste das microfresas está ligado aos parâmetros geométricos, material da ferramenta, revestimento, a peça usinada e o fluido de corte. Manso et al. (2019) analisou o desgaste da ferramenta na microusinagem do aço ferramenta H13, para diferentes parâmetros de corte ($f_z = 2, 4$ e $5 \mu\text{m}$ e Rotação = 30.000 e 46.000 rpm). A Figura 3.11 (a) ilustra a microferramenta de metal duro revestidas de TiAlN de $400 \mu\text{m}$ de diâmetro e raio de ponta (r_e) de aproximadamente $2,5 \mu\text{m}$ e ângulo de hélice de 30° para as ferramentas novas. Os autores mensuraram o desgaste pelo diâmetro, encontrando uma redução variando entre 16,8 e 22,7% para menores avanços ($f_z = 2 \mu\text{m}$ e Rotação = 30.000 rpm). Resultando também no mecanismo mais evidente o abrasivo nas ferramentas microfresadas (Fig. 3.12b).



(a)



(b)

Figura 3.11. Imagens do MEV do topo da ferramenta para medição do desgaste (a) e mecanismo de desgaste encontrado (b) (adaptado de MANSO et al.,2019).

3.8 QUALIDADE SUPERFICIAL NA MICROUSINAGEM

Devido à alta precisão para produzir componentes em microescalas, a rugosidade torna-se uma das grandes preocupações no microfresamento. Vários fatores influenciam a qualidade superficial, como a geometria da ferramenta, pois às características estruturais da ponta da ferramenta tem um impacto significativo na superfície dos canais (Geng et al., 2023). A otimização dos parâmetros de microfresagem, como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, podem ajudar a alcançar a rugosidade superficial desejada em diferentes materiais, como alumínio e cobre de alta pureza (JIANG, et al., 2022).

Espera-se que o efeito dos parâmetros de corte sejam similares à macrousinagem. Zhan et al. (2023) por exemplo, analisaram o efeito da velocidade de corte na rugosidade para o microfresamento da liga Ti6Al4V. Os resultados encontrados mostram que a rugosidade diminui com a velocidade de corte, como mostra a Figura 3.12.

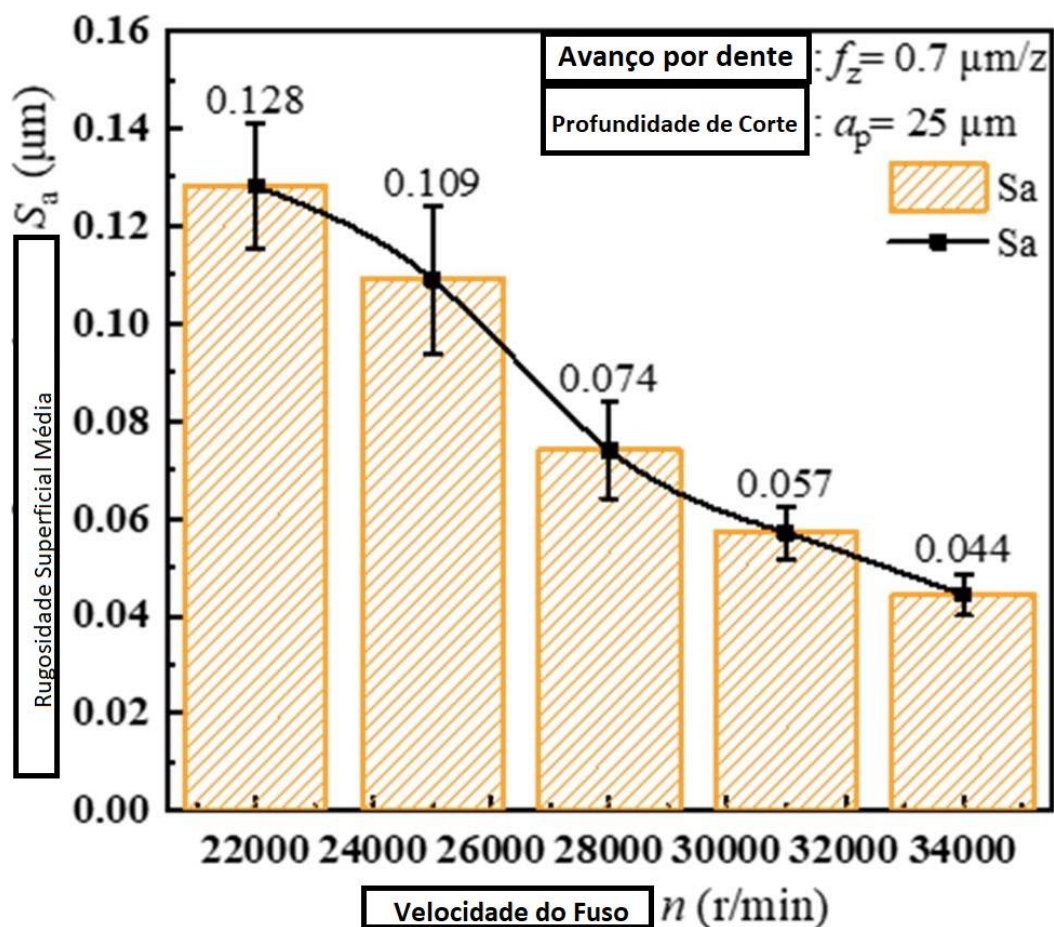


Figura 3.12. Rugosidade superficial com diferentes velocidades do fuso no microfresamento da liga Ti6Al4V (adaptado de ZHANG et al., 2023).

A instabilidade e a vibração no microfresamento são outros fatores que podem ter grande influência na rugosidade, devido às dimensões reduzidas serem bem suscetíveis a danos (SHI, et al., 2012; ASLAN & ALTINTAS, 2018). Por isso a importância nas pesquisas de monitorar os parâmetros de corte a fim de garantir um corte estável e diminuir esses problemas (RIBEIRO, et al., 2020).

Bodziak, et al. (2014) avaliaram a integridade superficial dos moldes de aços (AISI P20 e AISI H13) fabricados para microcomponentes pelos processos de microfresamento e eletroerosão, com microfresas de 0,7 μm de diâmetro. O aço ferramenta H13 obteve os maiores valores de tensão residuais, cerca de 44% superior ao aço P20, a rugosidade superficial por eletroerosão não obteve grandes diferenças nos materiais, entretanto, este processo formou uma camada branca de microfissuras em ambos materiais de forma mais intensa no aço H13. No processo de microfresamento, os autores encontraram maiores rugosidade no aço H13, se comparado com P20, isso foi atribuído à deflexão da ferramenta na microfresagem do H13, podendo ser visto na imagem na Figura 3.13. Devido à influência da ductilidade do material, é possível observar na superfície do microvazios e rebarbas geradas pela deformação plástica durante o corte.

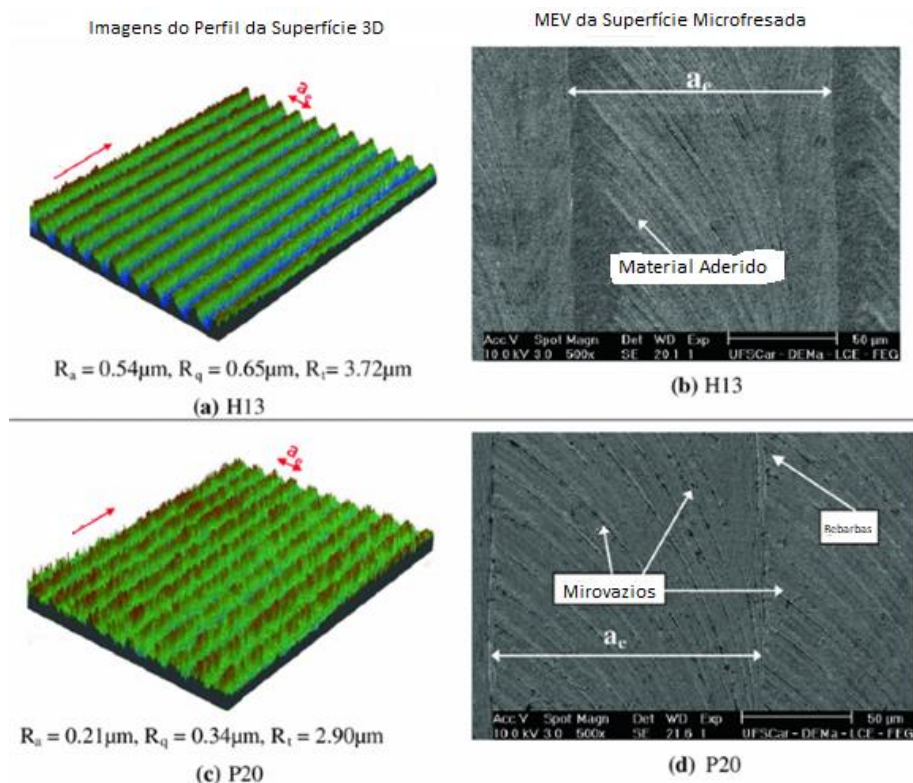


Figura 3.13. Imagens do perfil da superfície em 3D e MEV do microfresamento dos aços P20 e H13 (adaptado de BODZIAK, et al. 2014).

3.9 FORMAÇÃO DE REBARBA NA MICROUSINAGEM

A rebarba é definida como uma projeção indesejada da superfície usinada. A formação da rebarba pode levar a problemas relacionados a erro dimensional, encaixe, montagem de componentes e outros. Gillespie (1979) avaliou que o custo de um processo para remoção de rebarbas é de quase 30% do custo total de fabricação na operação de usinagem de precisão. A maioria das aplicações eletrônicas, aeroespaciais, biomédicas e ópticas requerem superfícies livres de rebarbas (ANAND KRISHNAN, et al., 2023). A qualidade de uma superfície microusinada está altamente associada ao tamanho das rebarbas formadas. Portanto, é importante compreender os fatores que afetam a formação de rebarbas e sua minimização.

A presença de rebarbas é uma característica de grande relevância em todos os procedimentos de usinagem. Na microusinagem, a questão das rebarbas se torna ainda mais significativa, uma vez que suas dimensões podem ser comparáveis à profundidade de corte. Além disso, a remoção de rebarbas para uma peça

microusinada é mais desafiador. A formação de rebarbas é influenciada por diversos fatores, uma vez que representam materiais deformados plasticamente que não são eliminados durante o processo (KOU et al., 2015). Li et al. (2019) sugerem que as rebarbas tendem a aparecer no topo do canal em velocidade mais baixa (n), menor avanço por dente (f_z) e maior profundidade de corte (a_p). Lee e Dornfeld(2005) mostraram que grandes rebarbas provavelmente ocorrerão quando a espessura de corte for menor que o raio de aresta. Vários fatores afetam a formação de rebarbas: geometria da ferramenta, material da peça e os parâmetros de corte. Portanto, para diminuir a formação de rebarbas, é importante entender a influência dos fatores.

As rebarbas formadas num processo de usinagem podem ser classificadas de várias maneiras. Yuan et al. (2022) classificaram os tipos de rebarbas de acordo com a localização da rebarba na peça de trabalho: superiores, de entrada, de saída, laterais de entrada e laterais de saída, conforme mostrado na Figura 3.14.

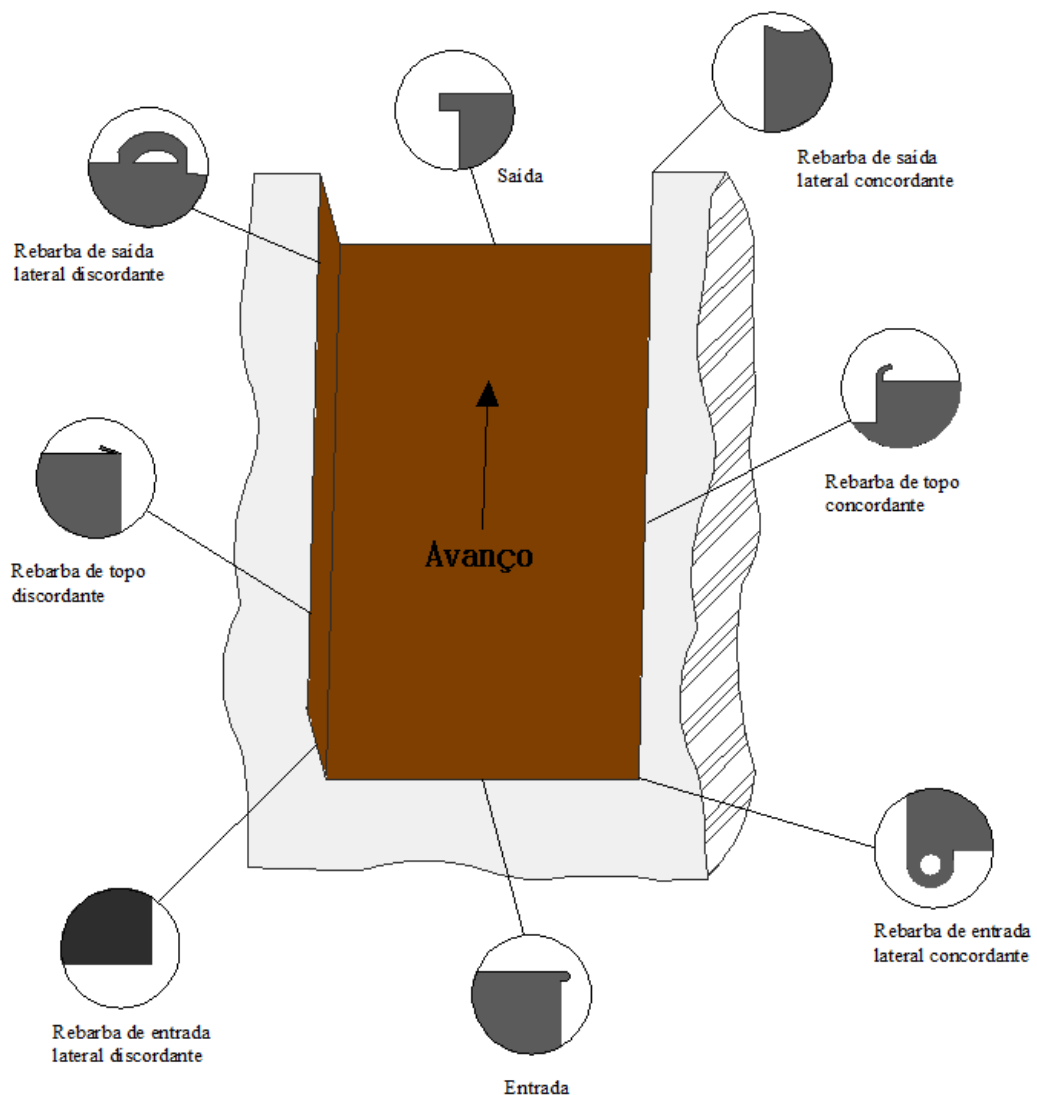


Figura 3.14. Vista esquemática da forma e localização da rebarba no canal fresado (adaptado YUAN et al., 2022).

Gonçalves et al., (2023) avaliou a influência no processo de microfresagem da liga Ti6Al4V forjada e fabricada por manufatura aditiva produzida por fusão a laser. Utilizando microfresas de topo revestidas com carboneto tungstênio TiAlN com duas arestas de corte de 0,5 e 0,8 mm de diâmetro, $V_c = 40$ e 60 (m/min) e $f_z = 1, 1,5$ e 2 (μm). Resultando em melhor rugosidade superficial a combinação de maior velocidade de corte e menor diâmetro da ferramenta, além de apresentarem menor taxa de remoção de material que formaram maiores rebarbas. A figura 3.15 apresenta uma comparação entre o melhor e o pior caso alcançado das ligas e ambos os diâmetros da ferramenta. Onde se observa maiores rebarbas para menor velocidade de corte, devido à taxa de remoção ser menor.

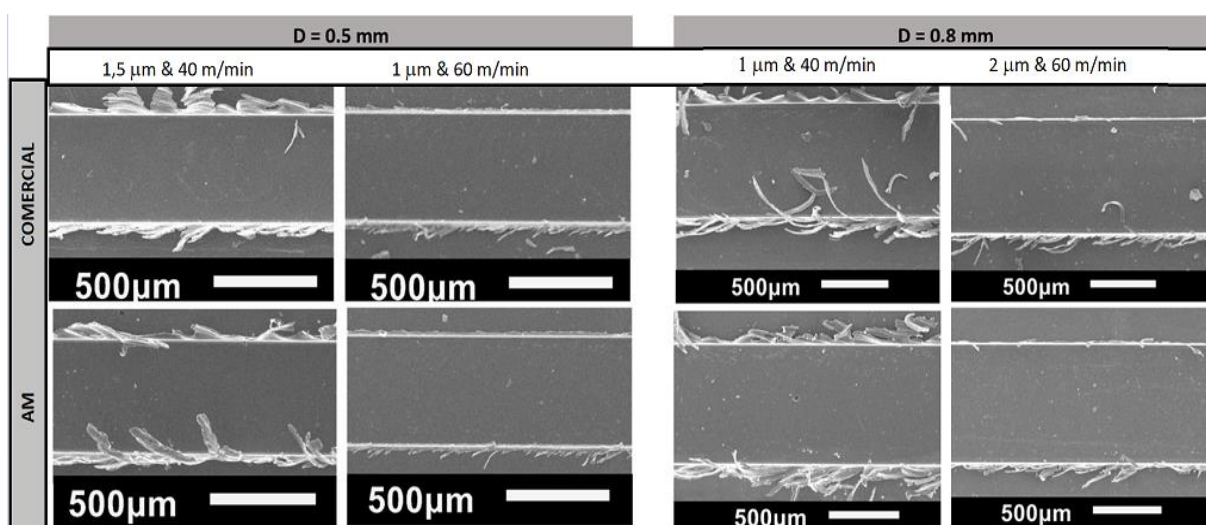


Figura 3.15. Vista do MEV da forma da rebarba com diferentes parâmetros de corte (adaptado GONÇALVES et al., 2023).

Sabendo que no microfresamento as rebarbas derivam da formação inacabada do cavaco, a Figura 3.3 apresentou como é formada as rebarbas dos lados concordantes e discordantes, após o processo em um único ciclo de corte. As rebarbas geradas podem variar seu padrão e tamanho.

Dentre as rebarbas localizadas no microcanal, as de topos são as mais estudadas por pesquisadores, pois geralmente são maiores que as demais e mais evidentes. Chern et al. (2007) também investigaram no microfresamento do alumínio,

e classificou as rebarbas em quatro outros tipos rebarba primária (Fig. 3.16.a), rebarba em forma de agulha (Fig. 3.16.b), rebarba tipo pena (Fig. 3.16.c) e rebarba menor (Fig. 3.16.d). Os pesquisadores chegaram à conclusão de que a rebarba primária se origina quando o material à frente da ferramenta é impulsionado, porém não chega a formar cavaco, sendo apenas deformado plasticamente e posteriormente quebra-se com dimensão próxima da metade do diâmetro da ferramenta. A rebarba primária pode ainda fragmentar suas extremidades resultando em rebarbas do tipo pena e agulha, assim como uma rebarba menor que surge devido ao uso de avanço e penetração de trabalho muito reduzidos.

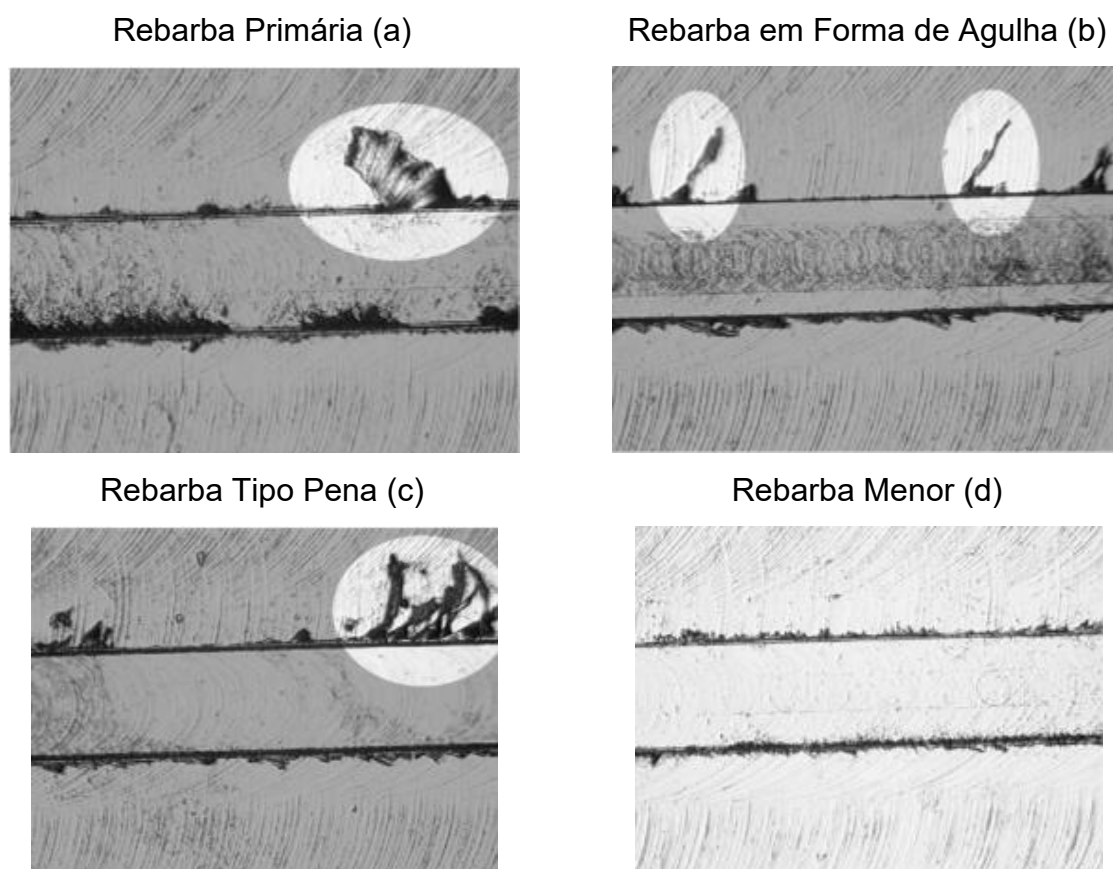


Figura 3.16. Tipos de rebarbas (adaptado de CHERN et al., 2007).

Os autores Silva e Da Silva (2019) também avaliaram a formação de rebarbas para o fresamento de topo de microcanais no aço inoxidável duplex UNS S32205 utilizando microfresas revestidas com AlCrN. Os pesquisadores realizaram ensaios a seco e com fluido de corte aplicado pela técnica de MQF. Os resultados mostraram que o uso do fluido de corte reduziu a formação das rebarbas e que, em todos os

ensaios, as rebarbas no lado concordante foram maiores que no lado discordante. Os autores classificaram as rebarbas encontradas em rebarba do tipo onda, conforme mostra a figura 3.17. As rebarbas geradas foram do tipo primário. O uso do fluido de corte reduziu o desgaste da ferramenta e diminui a média da altura da rebarba em aproximadamente 55% em comparação a condição a seco.

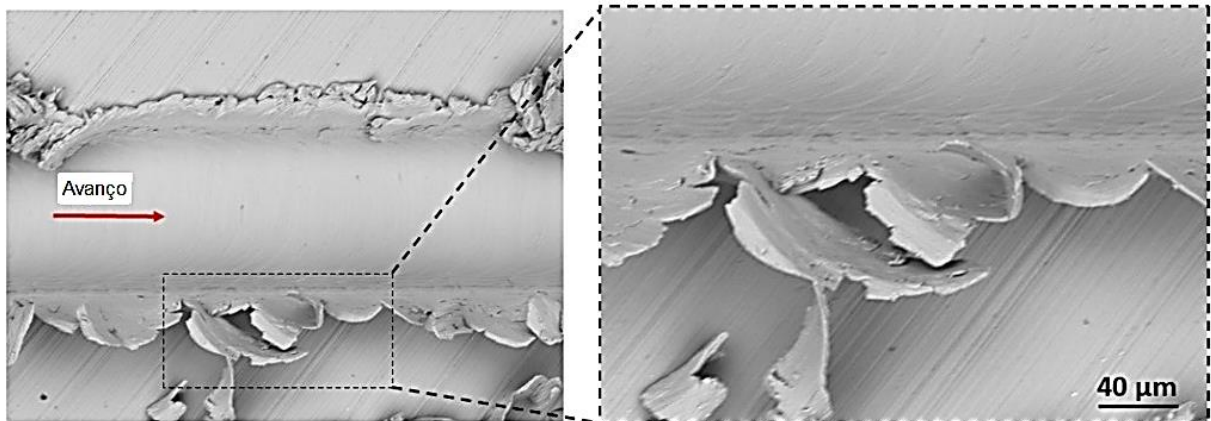


Figura 3.17: Rebarba do lado concordante com tipo onda do processo de microfresagem (SILVA & SILVA, 2019).

4. METODOLOGIA

Neste capítulo, serão apresentados as informações sobre os procedimentos experimentais e a metodologia realizada. O processo de usinagem escolhido para a execução desta pesquisa foi o microfresamento. Serão apresentadas informações mais aprofundadas dos demais ensaios sem processo de usinagem, detalhando os equipamentos e as técnicas utilizadas para as medições.

Foram realizados microfresamento de topo com ferramentas de 0,4 mm no Aço ferramenta H13, com diferentes fluidos de corte comerciais e com os óleos da Andiroba e Copaíba em duas direções, com a mesma direção e contrária ao avanço. Caracterizou o material usinado e os fluidos de corte utilizados nesse trabalho.

A figura 4.1 apresenta a metodologia utilizada na realização do trabalho experimental, seguindo uma ordem de execução.

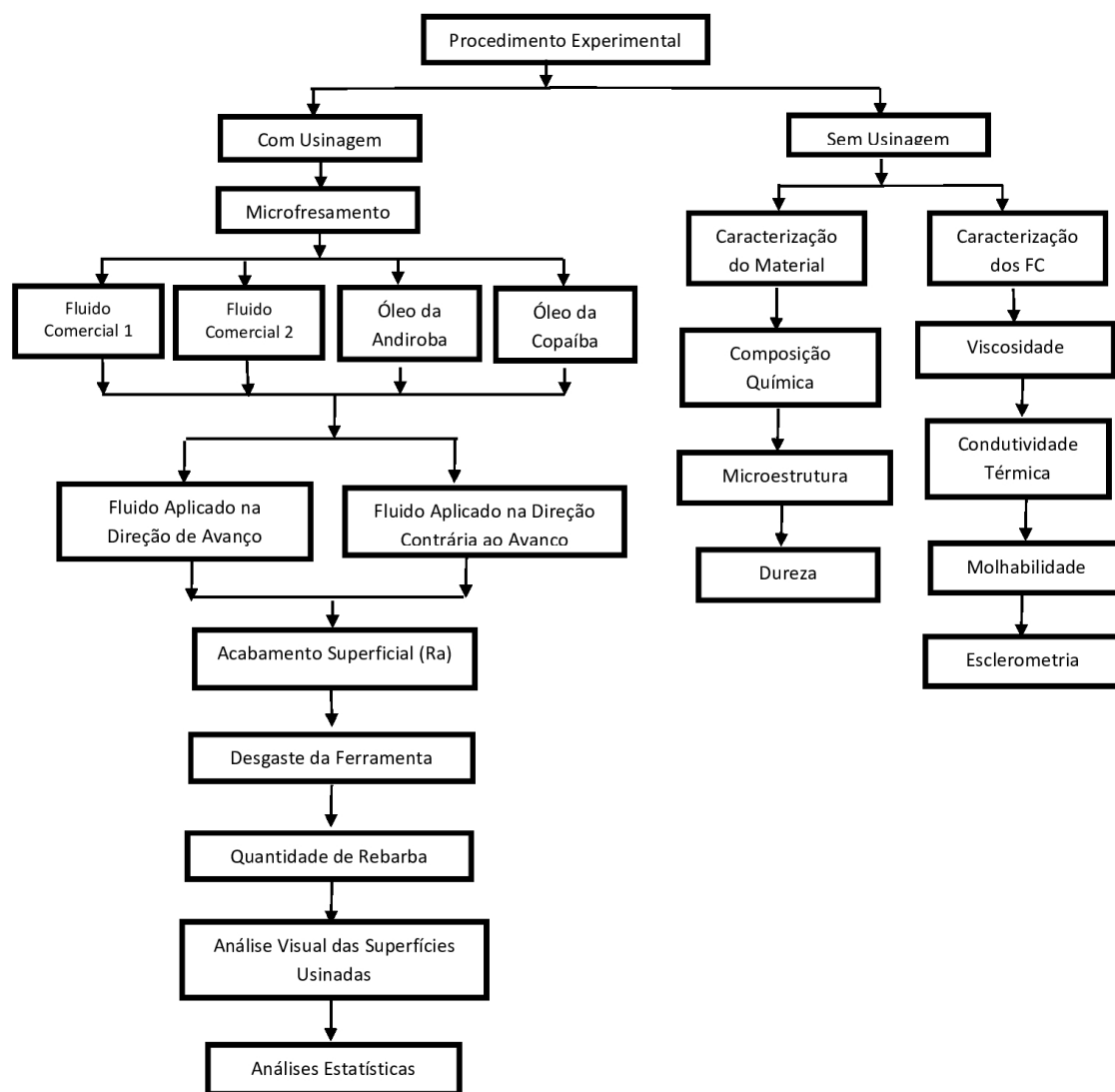


Figura 4.1: Fluxograma das atividades desenvolvidas

4.1. Planejamento Experimental

Para os ensaios foi utilizada uma microfresadora de bancada de precisão CNC Minitech Machinery Corporation modelo CNC Mini-mill/GX (Figura 4.2) foi utilizada nos testes para a fabricação de microcanais nas amostras analisadas. Essa máquina-ferramenta possui rotação do eixo árvore máxima de 60 000 rpm, 3 eixos com resolução de posicionamento de 0,1 μm e velocidade de avanço máximo de 1000 mm/min.



Figura 4.2: Microfresadora CNC Mini-mill/GX

A tabela 1 apresenta os parâmetros de corte e de aplicação de fluido utilizado em todos os ensaios.

Tabela 4.1: Planejamento dos ensaios

Rotação (rpm)	Velocidade de Corte (m/min)	fz ($\mu\text{m}/\text{z}$)	a_p (μm)	Pressão (bar)	Pulso (min)	Vazão (ml/h)
40 000	50,2	5,0	40	6	55	100

Foram realizados ensaios com a aplicação de fluido em duas direções diferentes pelo processo MQL: na direção de avanço e na direção contrária ao avanço. A Figura 4.3 ilustra a direção de aplicação assim como a posição dos bicos de aplicação de fluido, que foi mantida constante para todos os ensaios. Cada ensaio consistia na usinagem de 10 microcanais de comprimento 10 mm. Para cada fluido foi realizado um teste e uma réplica, sempre utilizando uma ferramenta de corte nova.

Os corpos de prova tinham dimensões de 55 mm x 28 mm x 10 mm. Os microcanis foram usinados ao longo da dimensão de 10 mm. Foi mantida uma distância entre os canais de 1,5 mm.

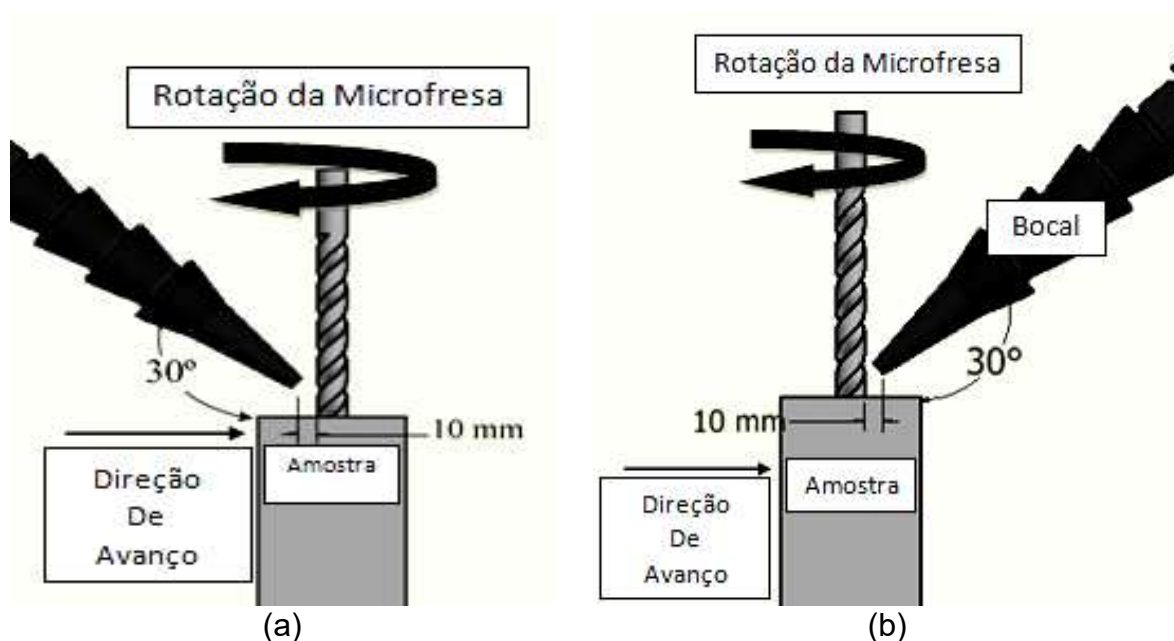


Figura 4.3: Montagem experimental para os ensaios (a) com o bocal com a mesma direção de avanço e (b) direção contrária.

4.2. Caracterização das microfresa utilizada nos ensaios

Para realização dos ensaios foram utilizadas microfresas com duas arestas de corte, pelo fornecedor Mitsubishi Materials de metal duro e revestida com (Al, Ti)N, com diâmetro de corte 0,4 mm e raio de aresta (r_ϵ) de $(1,1 \pm 0,1) \mu\text{m}$. Na figura 4.4 são apresentados alguns parâmetros geométricos da microfresa utilizada.

Parâmetros Geométricos	Microfresa
Comprimento Total (L)	40 mm
Comprimento de Corte (H)	0,8 mm
Diâmetro da Haste (D)	4 mm
Diâmetro de Corte (d)	0,4 mm (400 μm)

Arestas de Corte	2
------------------	---

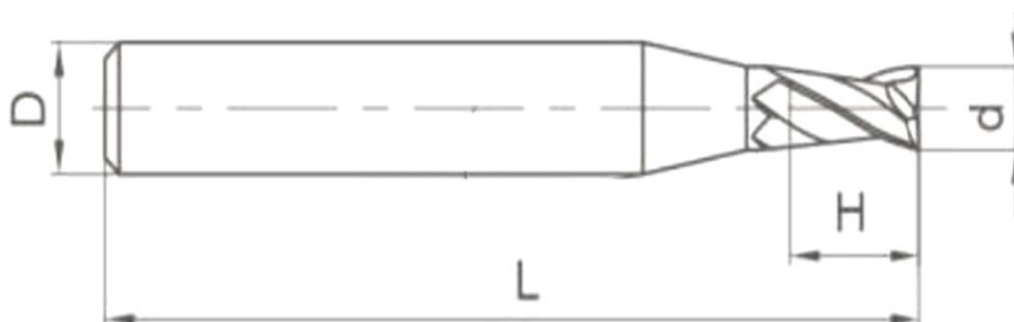


Figura 4.4: Parâmetros geométricos das microfresas com as dimensões (Adaptado de MITSUBISHI MATERIALS, 2018).

4.3. Caracterização do material dos corpos de prova

O material utilizado foi o aço H13, recozido, em formato de barra obtido pelo processo de laminação. A tabela 4.2 apresenta a composição química da amostra, através do método Espectroscopia de Emissão Ótica, segundo a norma ASTM E 415:2017 (2017).

Tabela 4.2: Composição química do AISI H13 obtida por espectroscopia de emissão ótica.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Cu	Ni	V
% em peso - SPECTROMAXx	0,38	0,91	0,3	0,01	0,005	5,09	1,27	0,01	0,08	0,31	0,85

Para análise da microestrutura. Para isso foram utilizadas lixas de diferentes granulometrias: #80, #120, #220, #320, #400, #600 e #1200 *mesh*. Em seguida a amostra foi polida utilizando alumina e atacada em média por 15 s com o reagente Nital (concentração de 10% de álcool). A Figura 4.5 mostra a imagem da microestrutura feita no microscópio ótico Olympus BX51M com aumento de 1.000 vezes e fotografada com sistema digital de captura de imagens DMC 1.0.

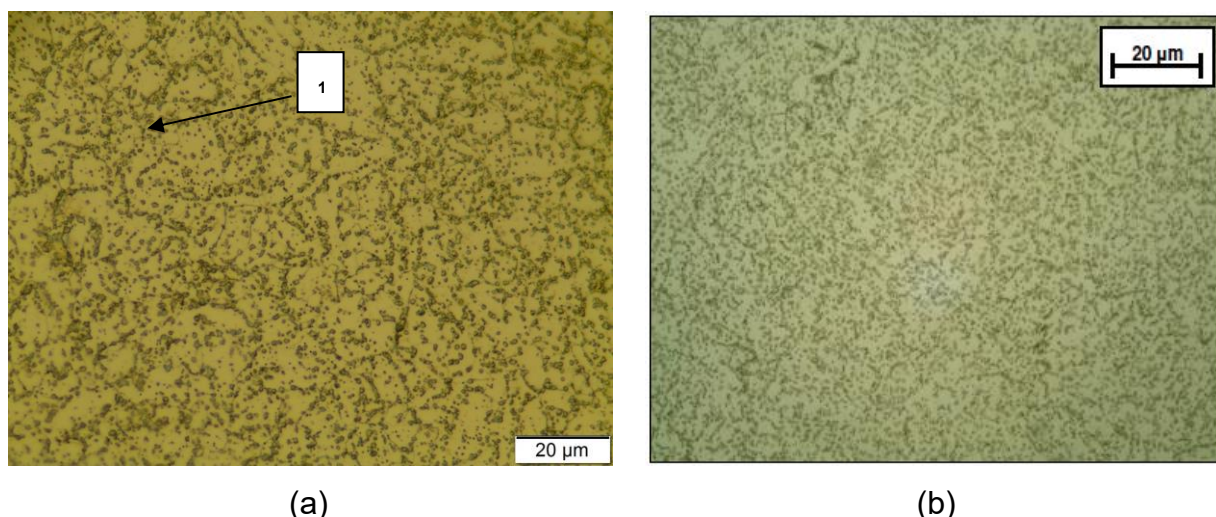


Figura 4.5: Microestrutura do aço H13 com presença de carbonetos esferoidizados (a) e a referência da literatura (GABARDO, 2008).

O aço H13 possui uma microestrutura de matriz martensítica revenida fina, na temperatura de austenitização, ou seja, a dissolução total de carbonetos ocorre acima de 1.100°C , dessa forma espera-se que possua grãos mais refinados que garanta boa tenacidade (DIEHL, 2017). O material encontra-se recozido e apresenta matriz ferrítica com presença de carbonetos esferoidizados (1) (Figura 4.5(a)), segundo Gabardo (2008) esta grande quantidade de carbonetos esferoidizados diminui a dureza do material. A análise de dureza foi realizada conforme a norma ABNT NBR ISO 6506-1:2019 (2019) em temperatura ambiente, a média obtida foi a partir de 3 medições, resultando em 193,7 HB.

4.4. Caracterização dos fluidos de corte

Foram utilizados 4 fluidos de corte sendo 2 comerciais e os óleos vegetais da Andiroba e da Copaíba. A Tabela 4.3 apresenta algumas propriedades segundo a ficha de informação de segurança de produto químico (FISPQ) de cada fluido de corte.

Tabela 4.3: Propriedades física e química dos fluidos de corte, segundo o fabricante.

Propriedades Físicas e Químicas, segundo a FISQP de cada fornecedor.				
Fluido de Corte	Fluido 1	Fluido 2	Óleo Vegetal da Andiroba	Óleo Vegetal da Copaíba

Odor	Característico, leve	N.D	Característico	Característico de madeira
Cor	Verde	Amarelo	Amarelo para Marrom	Amarelado, esverdeado para o marrom
pH	N.D	N.D	N.D	N.D
Ponto de Ebulição	200°C	N.D	N.D	N.D
Ponto de Fulgor	260°C	190°C	N.D	N.D
Ponto de Fusão	N.D	N.D	22°C	N.D
Densidade	0,88 – 0,91 g/cm ³ à 25°C	0,85 g/cm ³	0,926 g/cm ³ à 25°C	0,912 g/cm ³
Viscosidade	20-35 cSt à 25°C	31 mm ³ /s à 40°C	N.D	N.D
Informações Complementares	Fluido sintético para corte de metais	Fluido a base de álcool graxo para operação de MQL em Ligas Metálicas	Óleo vegetal, sistema de cultivo extrativista, originado da Floresta Amazônica	Óleo vegetal, sistema de cultivo extrativista, originado da Floresta Amazônica
Legenda:				
N.D: Não Disponível				

4.4.1. Medições da viscosidade e densidade dos fluidos de corte utilizados.

A viscosidade e a densidade dos fluidos de corte foram medidas utilizando o viscosímetro Modelo Stabinger™ SVM™ 3000 da empresa Anton Paar apresentado na Figura 4.6, no laboratório LEST-Nano da UFU.

O equipamento possui controle de temperatura interno mediante uma célula peltier e precisa de um pequeno volume de amostra (~2,5 ml) para executar as medições de viscosidade e da densidade. Desta maneira, foram medidas em uma faixa de temperatura de 20 a 80°C com incrementos de 10 °C. Os valores apresentados de viscosidade e densidade para cada valor de temperatura são resultado de uma média aritmética de 3 medições. É importante destacar que com intuito de eliminar a presença de ar dentro das amostras foi realizada uma agitação com banho ultrassônico com duração média de 5 minutos antes de cada medição.



(a)



(b)

Figura 4.6: (a) Identificação dos Fluidos de corte (1. Fluido 1, 2. Óleo da Copaíba, 3. Fluido 2 e 4. Óleo da Andiroba) e o (b) viscosímetro Anton Paar, Modelo Stabinger™ SVM™.

4.4.2. Medição da condutividade térmica dos fluidos de corte.

Para a medição da condutividade térmica foi utilizado o analisador de propriedades térmicas Linseis (THB1 – Transient Hot Bridge) do laboratório de LEST-Nano da UFU, Figura 4.7. O método THB utiliza uma sonda de fio de níquel isolada com kapton, que funciona como uma fonte de calor contínua, e possui um sensor de temperatura. O equipamento tem uma faixa de medição de condutividade térmica de 0,1 a 1 W/(m.K).

As medições de condutividade térmica para as amostras de fluido foram realizadas em uma faixa de temperatura de 40 a 70 °C com incrementos de 10 °C, foram feitas 10 medições para cada amostra de fluido de corte e considerada a média. Para atingir e manter as condições de temperatura desejadas foi utilizado um banho térmico. As amostras de fluido são depositadas em uma cuba com volume de 20 ml fabricada em aço inox com dupla parede que possibilita a troca de calor com o fluido à temperatura controlada pelo banho térmico. Sendo que os resultados obtidos são adquiridos através do software THB Measurement desenvolvido pelo fabricante.

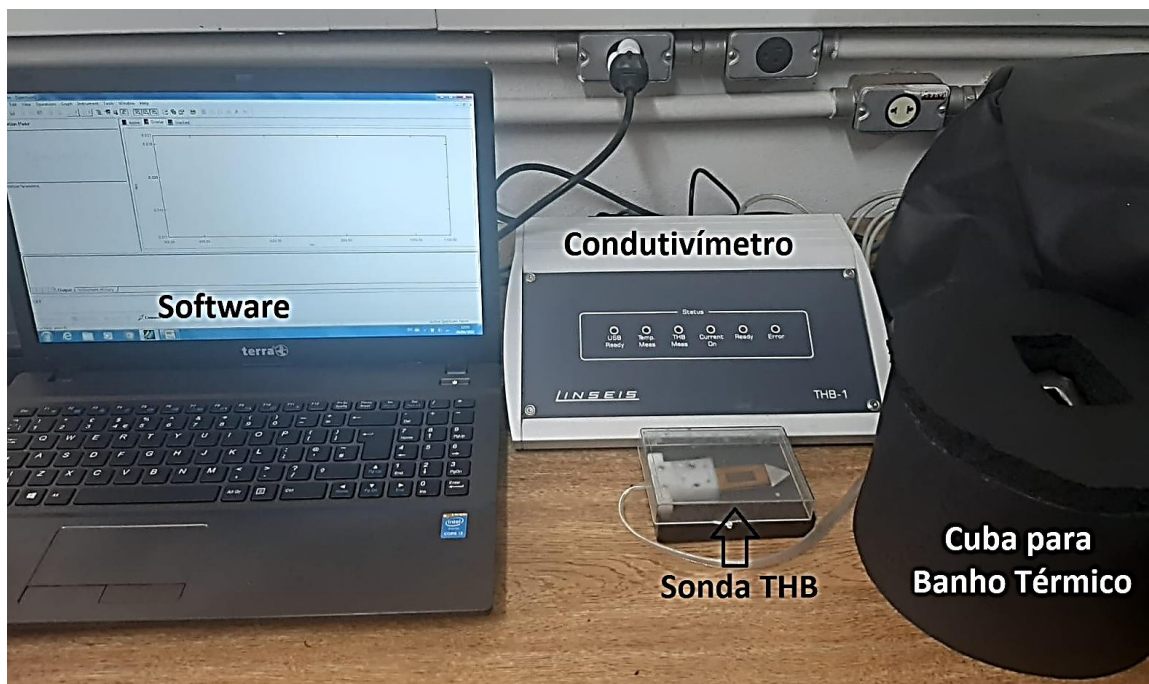


Figura 4.7: Sistema utilizado nos experimentos para medição de condutividade térmica pelo equipamento Linseis THB1.

4.4.3 Medição da molhabilidade dos fluidos de corte.

Foram realizadas medições da molhabilidade dos fluidos de corte utilizando um goniômetro da marca *Krusseasydrop*, do laboratório de Biomateriais e Engenharia de Superfícies da PUCPR. O ensaio consiste em depositar uma gota de 10 μ l de fluido sobre a superfície polida de um corpo-de-prova de aço H13, Figura 4.8. A superfície do corpo de prova tinha uma rugosidade Ra média de 0,050 μ m.

Para a análise de cada fluido, ocorreu a limpeza da seringa com álcool etílico seguido da secagem com jato de ar quente de modo a evaporar qualquer resíduo anterior.

O equipamento foi ajustado para depositar uma gota de fluido sobre a superfície e em seguida realizada a medição do ângulo em modo dinâmico e captura da imagem a cada 0,2 segundos por um período de 30s. Foram realizadas 8 medições para cada fluido de corte, o resultado do ângulo de contato é a média.

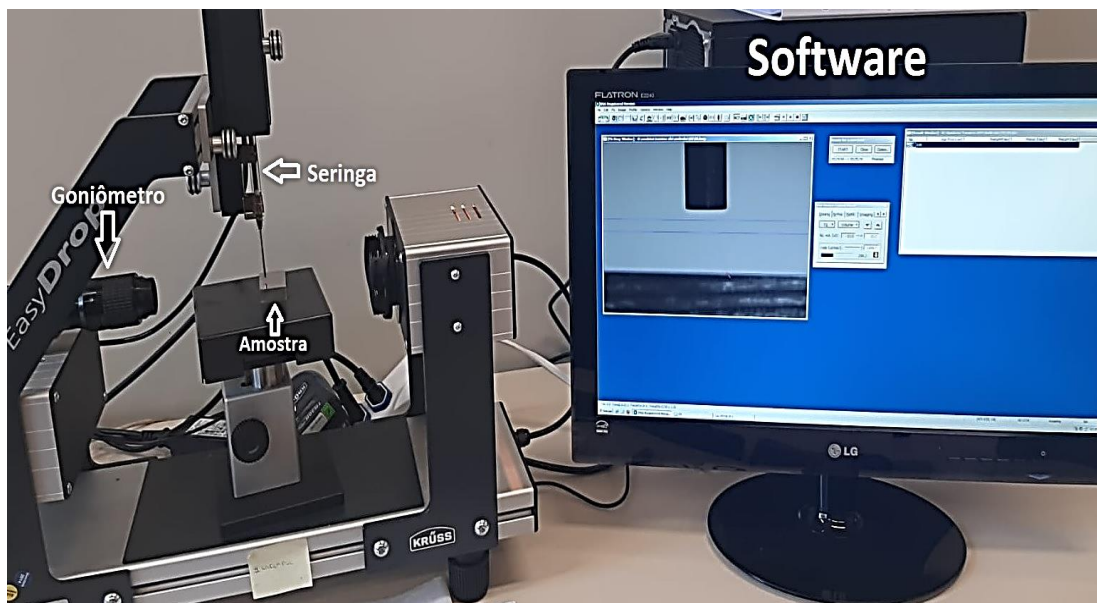


Figura 4.8: Bancada experimental para medição do ângulo de contato dos fluidos de corte.

4.4.4. Caracterização dos fluidos de corte utilizando esclerometria pendular

A Figura 4.9 ilustra o ensaio de esclerometria pendular utilizado para avaliar as características de lubrificação dos fluidos de corte. O ensaio consiste em produzir um risco na amostra por meio de um penetrador com geometria definida. A amostra é fixada numa porta amostra com ajuste micrométrico de altura. A metodologia utilizada foi baseada nos trabalhos de Franco (1989) e Amorim (2016). O ajuste da penetração foi padronizada para todos os ensaios de 120 μm .

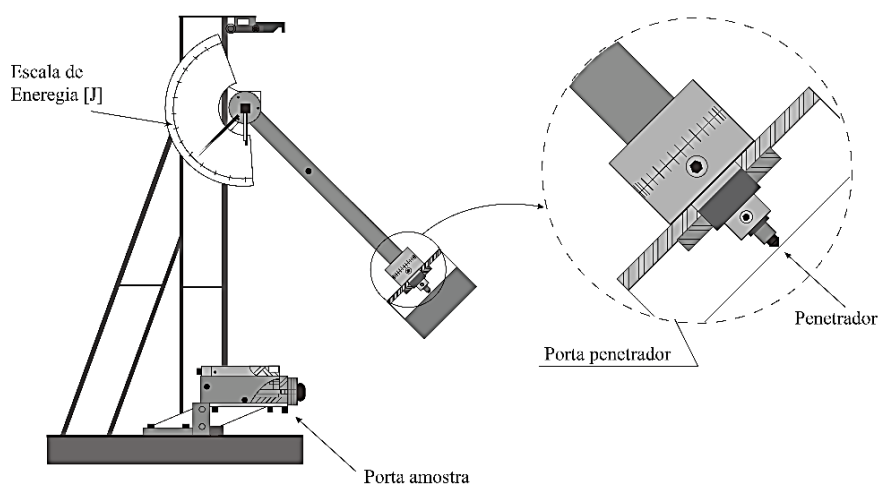


Figura 4.9: Esclerometro Pendular, com diversos componentes (Adaptado, Franco 1989).

Foi utilizado um penetrador de metal duro de formato de piramidal, com uma ponta truncada (0,48 mm) (Fig. 4.10.a). O fluido de corte foi colocado sobre a superfície isolada formando uma camada de 3 mm de espessura, com volume aproximado de 1 mL (Fig. 4.10.b).

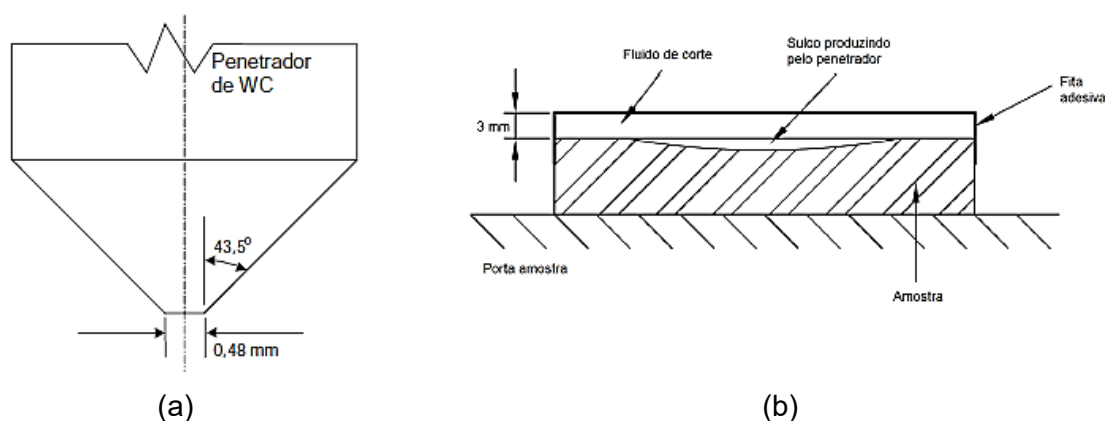


Figura 4.10: Detalhes da ponta do penetrador (a) Amostra submersa com fluido de corte (b) (Adaptado, Franco 1989).

O penetrador é fixado na extremidade do pêndulo com massa de 2,877 Kg, liberado com um ângulo de 154°, energia potencial armazenada de 19 J e velocidade de percurso 4,1 m/s (246 m/min) (Franco, 1989). Após cada risco, a amostra era limpa em banho ultrassônico, secado em seguida pesado em uma balança, modelo Sartorius BP 221S com resolução de 10-5g. Para cada novo ensaio, a máquina era referenciada e realizada um novo teste. Foram realizados três riscos para cada fluido de corte.

Através da Equação 1 calcula-se a energia específica de riscamento (e), diretamente no ensaio definida na relação entre energia dissipada para produzir o risco (E) e a perda de massa produzida (Δm).

$$e = E / (\Delta m) \quad (\text{J/mg}) \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

e: Energia específica de riscamento (J/mg)

E: Energia consumida na produção do risco (J)

Δm : Diferença de massa perdida (mg)

4.5. Medição da Rugosidade

A qualidade superficial dos microcanais foram analisadas por meio de imagens da superfície obtidas utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da Hitachi High-Technologies®, modelo TM3000 (Figura 4.11a).

A rugosidade da superfície dos canais foram medidas por meio do perfilômetro Form Talysurf Intra 2 da Taylor Hobson, com resolução de $0,016 \mu\text{m}$ (Figura 4.11b). Para a obtenção destas medições, é necessário posicionar a ponta do apalpador dentro do canal de forma que ele percorra somente no canal, no sentido perpendicular às marcas de avanço. O comprimento de amostragem (cut-off) utilizado foi de $0,25 \text{ mm}$ e o comprimento de avaliação de rugosidade de $1,25 \text{ mm}$, pois, segundo a norma ABNT NBR ISO 4288 (2008), para valores de rugosidade $0,02 < R_a \leq 0,1 \mu\text{m}$, deve-se utilizar esse parâmetro de medição.

As medições de rugosidade foram realizadas em 3 diferentes regiões de cada microcanal. Os parâmetros analisados foram: desvio aritmético médio (R_a) e desvio médio quadrático (R_q). O R_a foi analisado por ser um parâmetro amplamente utilizado na indústria, possibilitando a comparação de resultados. O R_q também foi escolhido por ser um parâmetro sensível às variações no perfil de rugosidade, uma vez que evidência a presença de picos e vales. Para análise dos resultados mais detalhada, considerando diversos aspectos do perfil da superfície do canal, foram considerados diferentes parâmetros, como: R_t , R_z , R_{sk} e R_{ku} .



(a)



(b)

Figura 4.11: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da Hitachi High-Technologies, modelo TM 3000 (a) e Perfilômetro Taylor Hobson (b).

4.6. Análise do Desgaste da Ferramenta

Todas as ferramentas foram analisadas no MEV antes da usinagem, para verificação da integridade da mesma. A Figura 4.12 ilustra um exemplo de imagens de topo (superfície secundária de folga) das microfresas novas no MEV.

Após a usinagem dos 10 micro canais, comprimento de avanço usinado de 100 mm, as microferramentas foram novamente analisadas no MEV. O desgaste foi medido através da variação do diâmetro com o auxílio do *software Image*, como ilustra a Figura 4.13. Imagens da ferramenta desgastada foram sobrepostas às imagens da ferramenta nova, afim de mensurar o desgaste das microferramentas.

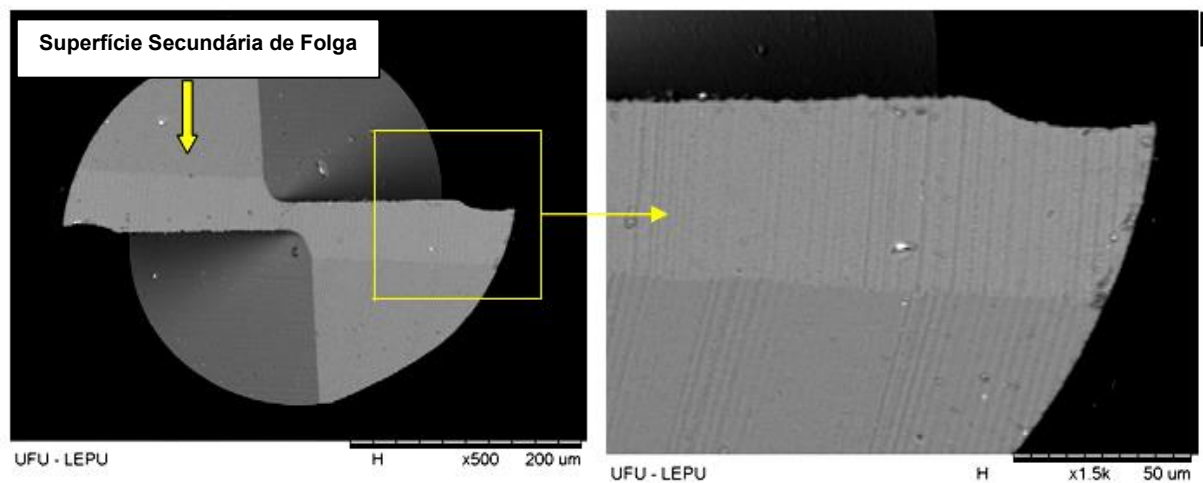


Figura 4.12: Imagens de topo (superfície secundária de folga) e a aresta de corte para avaliar a integridade das microferramentas.

O resultado dos valores do desgaste das microferramentas foi expressa em perda percentual (%), conforme a Equação 2

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{D.I - D.F}{D.I} \times 100 \% \text{ (Equação 2)}$$

Sendo:

D.I: Diâmetro Inicial (µm)

D.F: Diâmetro Final (µm)

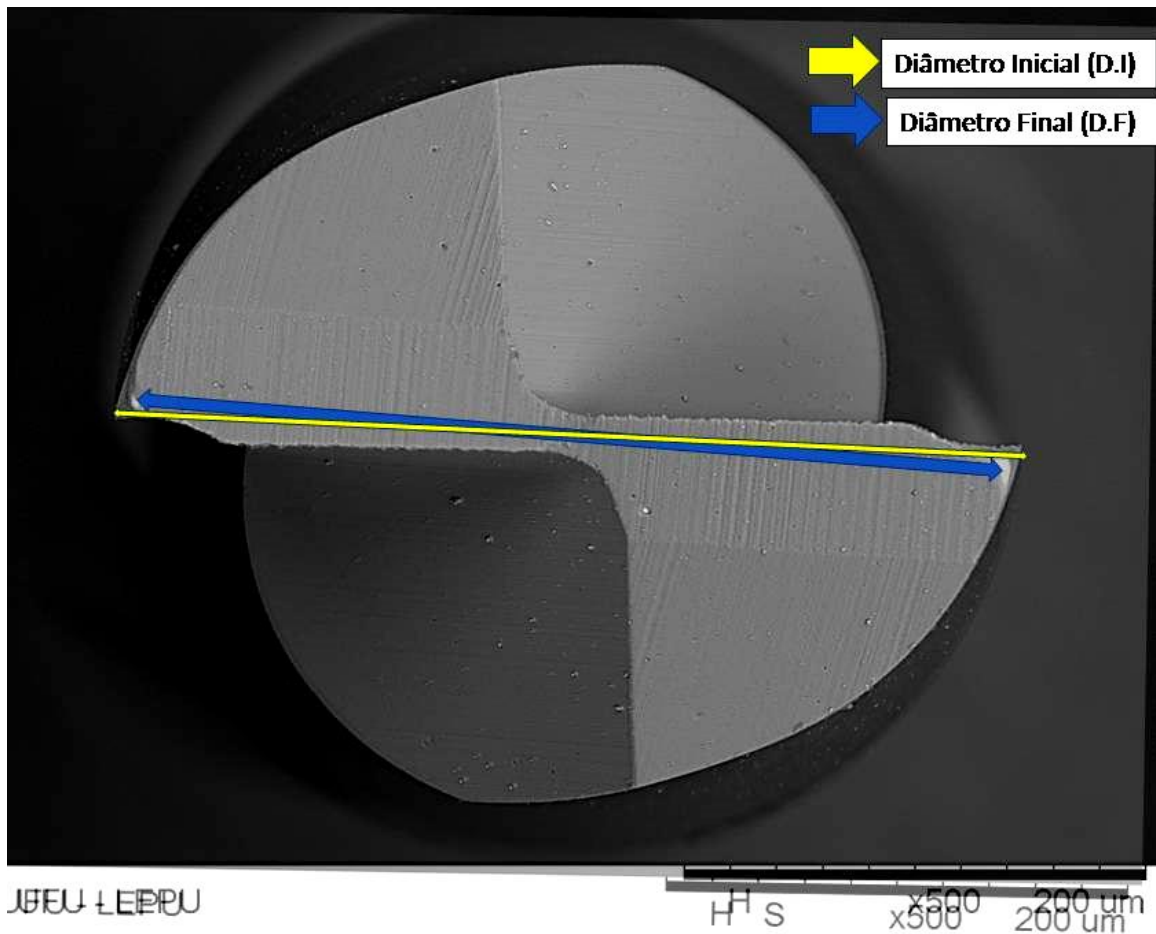


Figura 4.13: Representação da metodologia para medição do desgaste da ferramenta através da comparação do diâmetro inicial e final.

4.7. Análise e Medição da Rebarba

As rebarbas formadas foram analisadas e medidas com as imagens obtidas pelo MEV. Foram selecionadas três regiões ao longo de cada canal usinado, no início, meio e no final para analisar a evolução do tamanho das rebarbas formadas através da medição da área da rebarba para um determinado comprimento de referência.

As imagens das rebarbas foram trabalhadas com o auxílio do programa *ImageJ*. Assim, foi possível quantificar a área selecionada dos lados concordantes e discordantes de cada microcanal, conforme ilustra a Figura 4.14.

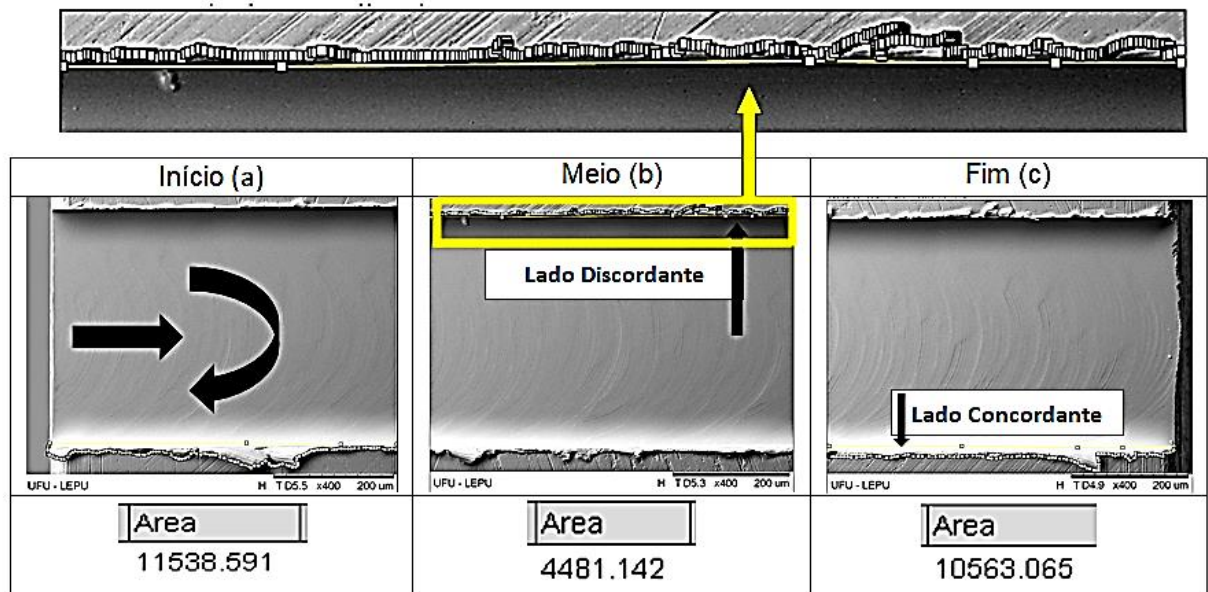


Figura 4.14: Imagens capturadas de referência utilizadas foram no (a) início, (b) meio e (c) final do microcanal, as setas ilustram o sentido de rotação e avanço e os lados discordante e concordante.

4.8. Análise Estatística

As análises estatísticas foram baseadas em um planejamento fatorial completo, com três fatores, são eles: fluido de corte, direção de aplicação de fluido e comprimento usinado, sendo quatro níveis para o fluido de corte, dois níveis para a direção de aplicação e dez níveis para o comprimento usinado. A Tabela 4.4 detalha os fatores considerados e seus níveis:

Tabela 4.4. Fatores e variáveis utilizados neste trabalho.

Fatores	Variáveis
Fluido de Corte	Fluido 1, Fluido 2, Copaíba e Andiroba
Direção de Aplicação	Mesma Direção (MD) e Direção Contrária (DC)
Comprimento Usinado	1,2,3,4,5,6,7,8,9 e 10

A partir deste planejamento foi realizada a análise de variância (ANOVA) usando a linguagem de programação R e o software Rstudio. Foi considerado um nível de significância de 0,05. As respostas avaliadas foram a rugosidade (R_a) e a rebarba do lado concordante. Foram considerados os efeitos principais e interações entre os fatores.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS FLUIDOS DE CORTE UTILIZADOS

Neste capítulo, apresenta-se a discussão dos resultados obtidos na fase de caracterização das principais propriedades físico-química dos fluidos de corte, são elas: viscosidade, densidade, condutividade térmica, molhabilidade, esclerometria pendular. E o microfresamento com a aplicação por MQL na mesma direção e contrária a direção de avanço com as seguintes variáveis de saída: Rugosidade (R_a , R_q , R_t , R_z , R_{sk} , R_{ku}), desgaste da ferramenta, mecanismo de desgaste e formação de rebarbas.

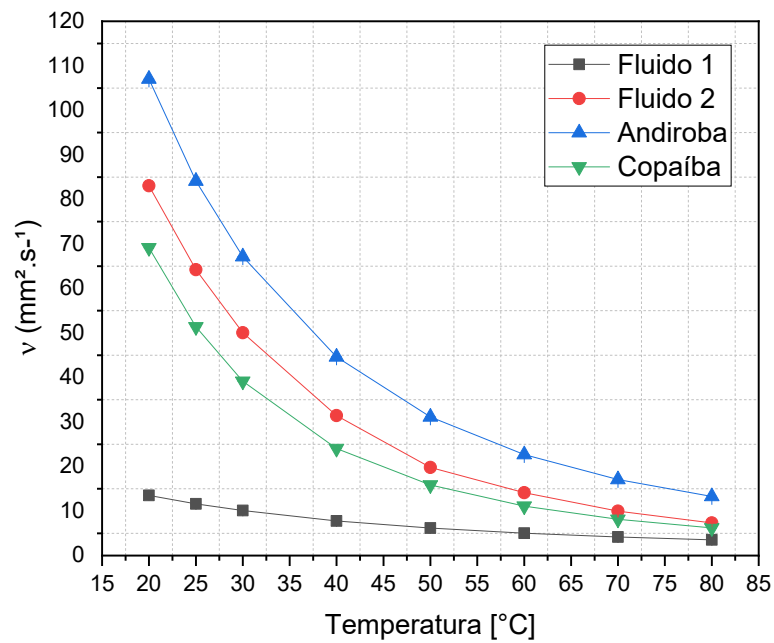
5.1.1 Viscosidade e Densidade

Uma das principais funções de um óleo de corte para operações de baixa velocidade de corte é a lubrificação. Assim, a viscosidade de um fluido, é de extrema importante propriedade para aplicação em processos de usinagem. De maneira geral, há dois tipos distintos de viscosidade: a viscosidade cinemática e a viscosidade dinâmica. A viscosidade dinâmica, que varia com a temperatura, é descrita como a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada ao fluido e a taxa de cisalhamento. Já a viscosidade cinemática é definida como a proporção entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido, sendo um parâmetro amplamente empregado por fabricantes de fluidos de corte para caracterizá-los. (FINZI,2017).

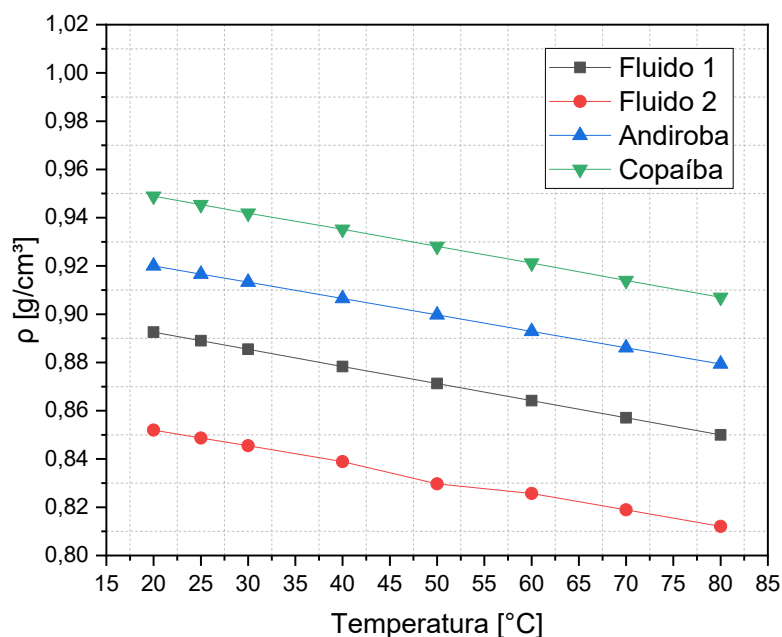
Os resultados experimentais obtidos para a viscosidade para os diferentes fluidos de corte são apresentados na tabela 5.1 e na Figura 5.1.

TABELA 5.1: Valores obtidos no ensaio de viscosidade dinâmica (μ), cinemática (ν) e densidade (ρ).

T (°C)	μ (mPa.s)				ν (mm ² .s ⁻¹)				ρ (g/cm ³)			
	Fluido 1	Fluido 2	Andiroba	Copaíba	Fluido 1	Fluido 2	Andiroba	Copaíba	Fluido 1	Fluido 2	Andiroba	Copaíba
20	12,06	70,76	98,47	65,59	13,52	83,05	107,0	69,12	0,89	0,85	0,92	0,94
25	10,33	54,52	77,09	48,57	11,62	64,22	84,12	51,38	0,88	0,84	0,91	0,94
30	8,94	42,31	61,31	36,85	10,10	50,05	67,14	39,13	0,88	0,84	0,91	0,94
40	6,83	26,38	40,45	22,48	7,78	31,44	44,62	24,05	0,87	0,83	0,90	0,93
50	5,39	20,27	28,02	14,72	6,18	19,78	31,15	15,87	0,87	0,82	0,89	0,92
60	4,35	11,64	20,24	10,23	5,03	14,12	22,66	11,11	0,86	0,82	0,89	0,92
70	3,58	8,17	15,14	7,45	4,18	9,98	17,09	8,15	0,85	0,81	0,88	0,91
80	3,01	5,94	11,67	5,65	3,54	7,31	13,28	6,21	0,85	0,81	0,87	0,90



(a)



(b)

FIGURA 5.1. Viscosidade cinemática (a) e densidade (b) em função da temperatura para todos os fluidos de corte.

Conforme ilustrado nas Figuras 5.1(a) e 5.1(b) observa-se que o óleo de andiroba exibe um nível mais alto de viscosidade. O fluido comercial Fluido 2 e o óleo de copaíba, por outro lado, apresentam valores que estão mais próximos, enquanto o fluido comercial Fluido 1 demonstra um nível mais baixo de viscosidade. Essa disparidade pode ser atribuída ao fato de que os óleos vegetais geralmente possuem maior viscosidade devido ao comprimento de sua cadeia de triacilglicerol, e essa viscosidade diminui com a presença de insaturações. Além disso, as propriedades reológicas desses óleos são influenciadas por vários outros fatores, incluindo temperatura, taxa de cisalhamento, tempo, pressão, aditivos e catalisadores. Além disso, essas propriedades estão diretamente ligadas ao tamanho e orientação das moléculas (GALVÃO, 2007). Essa característica varia em óleos vegetais e está relacionada ao grau de insaturação, ao tamanho das cadeias graxas que compõem os óleos, além de poder ser afetada pela presença de ramificações e pela localização das insaturações.

Valores da viscosidade cinemática e dinâmica para os óleos da andiroba e copaíba foram pesquisados por outros autores. Com valores próximos desta pesquisa.

Cavalcante et al. (2016) realizaram uma pesquisa afim de otimizar a produção de polióis a base do óleo de andiroba com modificações químicas e avaliaram diversos parâmetros físico-químico (índice de acidez, viscosidade cinemática, índice de saponificação, teor de umidade, índice de iodo, de peróxido, de hidroxila, estabilidade oxidativa, e massa específica. Os valores experimentais para o óleo de andiroba *in natura* resultou na viscosidade cinemática a 40°C inicial em 35,4 e final a 100°C em 5,53 (mm².s⁻¹). De maneira semelhante, Alves, et al (2015) analisaram experimentalmente os parâmetros físicos e químico de diferentes óleos essenciais, no município de Mâncio Lima, no Estado do Acre, os mesmos encontraram resultados da viscosidade em de 45 mPa.s na temperatura de 25°C para o óleo da copaíba.

A Figura 5.1 mostra que as viscosidades diminuem com a temperatura e, para 80 °C (temperatura máxima do teste), as viscosidades de todos os fluidos estão próximas. Esse resultado sugere, portanto que, para as temperaturas da zona de corte, pelo menos para os processo convencionais de usinagem, a viscosidade pode não fazer diferença.

5.1.2 Condutividade Térmica

A função de um fluido de corte, é a refrigeração da zona de corte, principalmente ferramenta e peça. Desta forma, a condutividade térmica se torna uma importante característica de um fluido. Por esta razão, este trabalho avaliou esta propriedade para os fluidos utilizados. Os resultados são apresentados a seguir.

Na Figura 5.2 ilustra os valores de condutividade térmica (k) medidos para os fluidos de corte investigados em diferentes temperaturas. Nota-se que o Fluido 1 obteve maior condutividade térmica e com o aumento da temperatura uma ligeira redução. Em seguida o óleo da Andiroba e Fluido 2 que tiveram resultados menores. O óleo da Copaíba gerou a menor condutividade. Nota-se que a condutividade térmica dos diferentes fluidos de corte apresenta um comportamento linear em função da temperatura investigada, verificando-se uma ligeira redução dos valores desta propriedade em função da variável de medida.

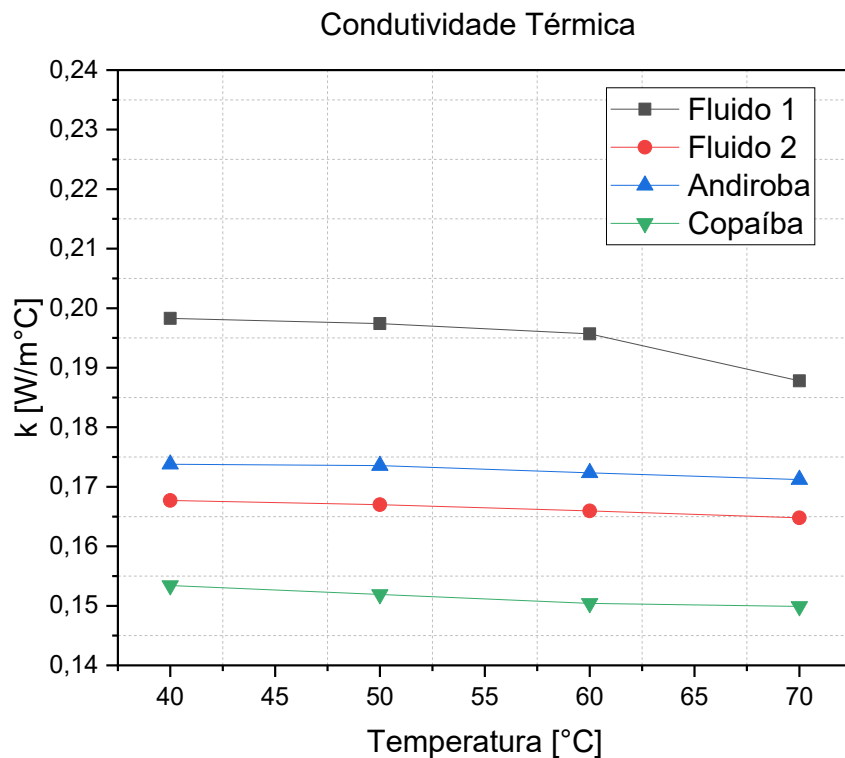


FIGURA 5.2: Condutividade relativa para os fluidos de corte em função da temperatura.

Brock et al. (2008) ao determinar experimentalmente a viscosidade, condutividade e difusividade térmica de diversos óleos vegetais, concluíram que este comportamento reológico se deve a diferente composição química dos óleos vegetais. Os óleos vegetais possuem cadeias longas de triglicerídeos, que contêm ácidos graxos, e apresentam uniformidade na cadeia, com pequenas quantidades de ácidos livres. Na composição dos óleos vegetais, os principais ácidos graxos podem ser insaturados ou saturados. Os ácidos oléicos (C18:1), linoléicos (C18:2) e linolênicos (C18:3) correspondem ao grupo dos insaturados e por outro lado, os ácidos palmíticos (C16:0) e esteáricos (C18:0) estão no grupo dos saturados (MANNEKOTE et al., 2018).

De acordo com Çengel & Ghajar (2012), normalmente, a condutividade térmica de uma substância é mais elevada quando está no estado sólido, moderada no estado líquido e mais baixa no estado gasoso. Em alguns casos, a condução de calor dos líquidos diminui com o aumento da massa molar, como acontece nos gases. Asadi et al. (2018) cita que as propriedades termo-físicas de um fluido, como a condutividade térmica e a viscosidade dinâmica, influenciam de maneira significativa no seu desempenho. De acordo com os autores, maior condutividade térmica significa maior

desempenho de transferência de calor, enquanto menor viscosidade resulta em menor poder de bombeamento e redução de pressão. Como este trabalho utiliza um sistema de MQL, nota-se a importância em avaliar o comportamento dos fluidos como por exemplo tamanho das gotas formadas e distribuição ao longo do fluxo.

5.1.3 Molhabilidade dos Fluidos de Corte

A molhabilidade de um fluido de corte também pode ser uma propriedade, tanto para refrigeração quanto para lubrificação. Um fluido é considerado molhante (tende a molhar a superfície) quando o ângulo de contato (Θ) se situa entre 0 e 90° e não-molhante quando este ângulo está entre 90° e 180° (Wang et al, 2009). O formato esférico de uma gota de um fluido de corte é resultado de uma gota com baixa tensão superficial sobre uma superfície de alta energia, neste caso, o ângulo de contato é baixo e o fluido pode ser considerado de alta molhabilidade. Gajrani et al. (2019) durante o processo de torneamento de barras cilíndricas de aço AISI H-13 temperadas com 50 mm de diâmetro e comprimento de 250 mm e a dureza média do material da peça é 56 $\pm$ 2 HRC, os autores investigaram a molhabilidade de diferentes fluidos de corte. Os autores observaram que, ao comparar a água (64,1°) com o óleo mineral comercial e a adição de 0,3% de CaF₂ com base em HN-GCF (HN-GCF-0,3C) (55° e 45,2°, respectivamente), os últimos apresentaram uma tensão superficial mais baixa. Consequentemente, esses fluidos tenderam a se espalhar mais, o que resultou em uma melhor lubrificação entre a interface ferramenta-peça em comparação com a água.

A molhabilidade para os fluidos utilizados neste trabalho foi analisada a partir dos resultados do ângulo de contato e pode ser verificada de diversas formas nas Figuras 5.3 apresenta a variação do ângulo de contato em decorrer do tempo, na Figura 5.4 o ângulo de contato da gota no tempo de 2 segundos de cada ensaio e na Figura 5.5 ilustra a forma da gota nos tempos 2,5, 20 e 30 segundos.

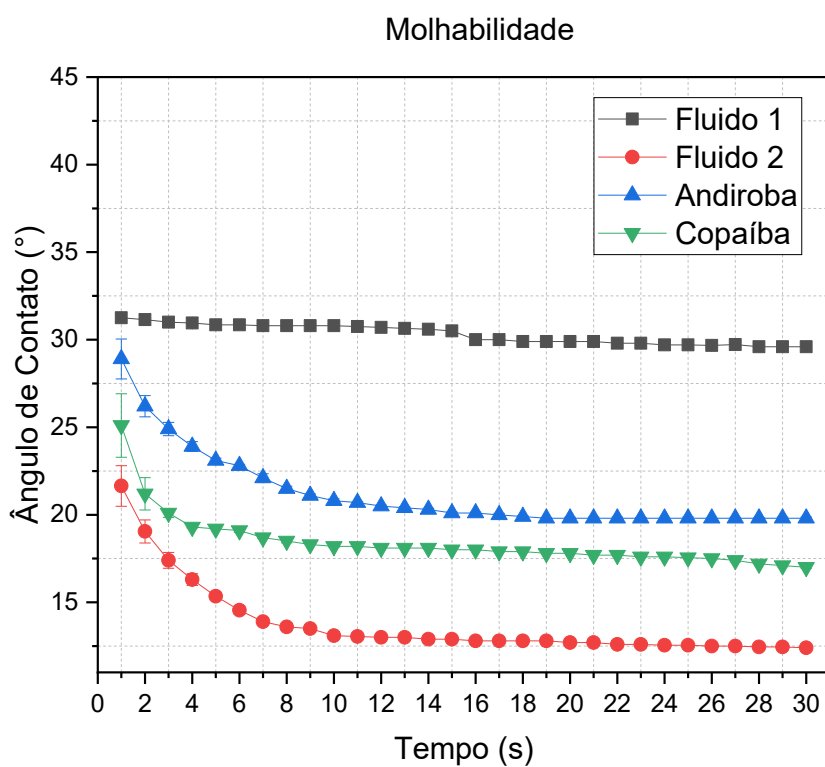


FIGURA 5.3:Variação do ângulo de contato no decorrer do tempo.

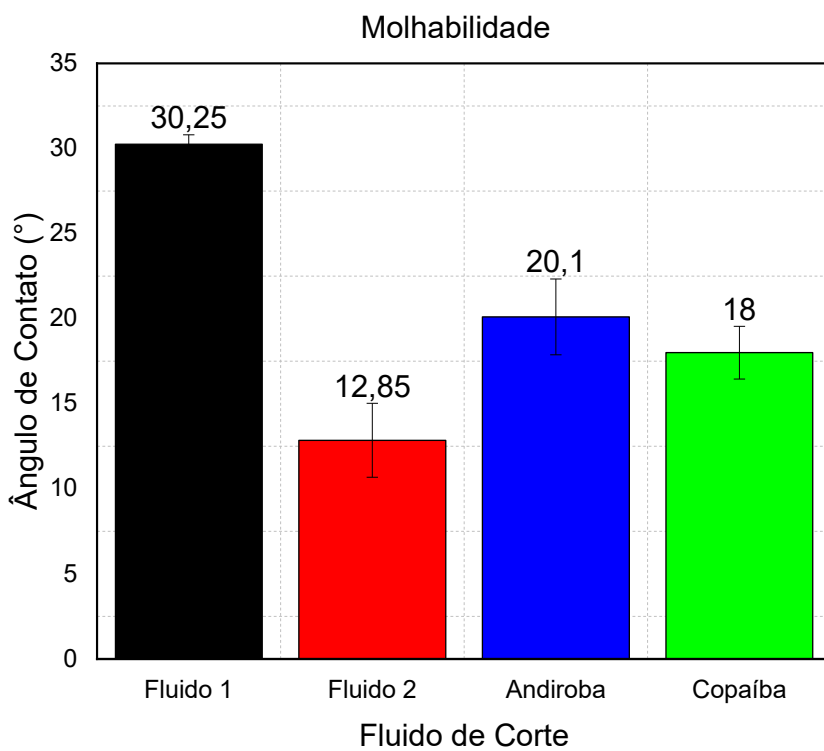
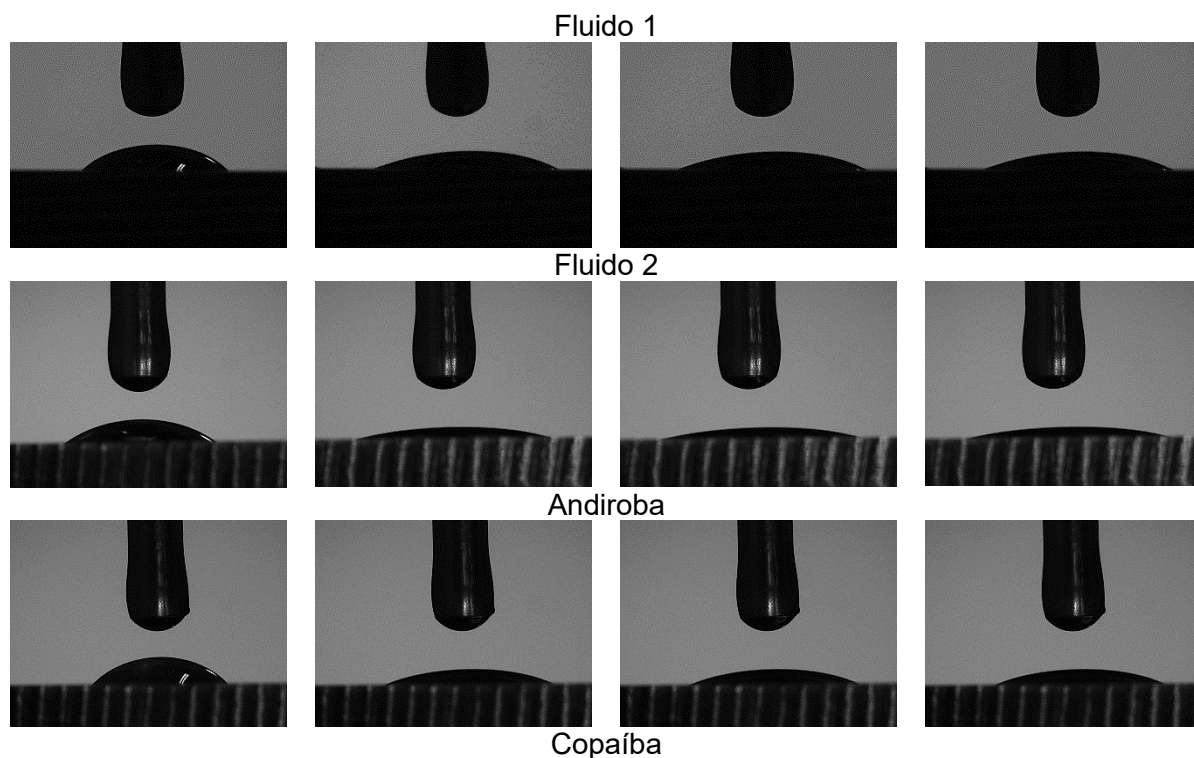


FIGURA 5.4. Ângulo de contato estático em 2 segundos após o contato inicial da gota na superfície.

Observa-se que o Fluido 1 apresentou maior ângulo de contato, ou seja, possui a menor molhabilidade entre os fluidos analisados. Isso significa que ele se espalhará menos na superfície do material testado, o que pode ser observado por meio da comparação das imagens na Figura 5.4. O Fluido 2, que obteve menor ângulo de contato, é o que mais se espalha sobre a superfície do material (aço ferramenta H13). Os óleos vegetais, andiroba e copaíba, tiveram resultados intermediários de ângulos de contato, sendo a molhabilidade da copaíba superior.

A Figura 5.5 mostra que, após 30 s, o ângulo de contato é menor do que 90° para todos os fluidos. Este resultado indica que todos possuem boa aderência à superfície, ou seja, boa molhabilidade. Segundo Rahman et al. (2019) o espalhamento e o umedecimento da superfície podem ser afetados pela aspereza e heterogeneidade da superfície da amostra, reações entre líquido e sólido e as condições atmosféricas. Se a gota repousar sobre uma superfície perfeitamente nivelada e homogênea, o ângulo de contato (θ) está em equilíbrio e menor que 90° , neste caso, o líquido se espalha espontaneamente. Por outro lado, não há espalhamento e umedecimento da superfície quando o ângulo de contato for superior a 90° .



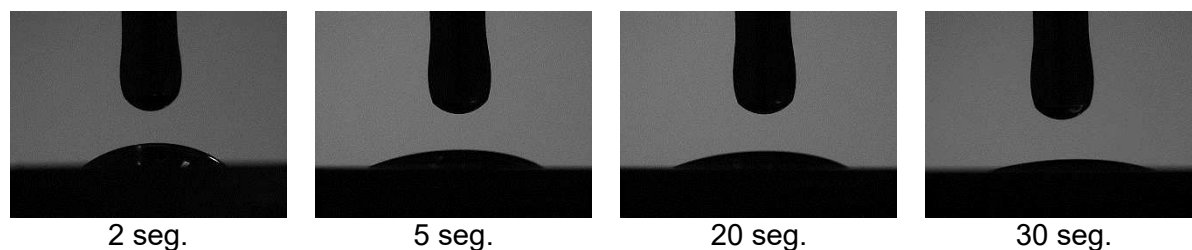


FIGURA 5.5: Formato dos ângulos das gotas para os FC nos tempos de 2, 5, 20 e 30 segundos.

O ângulo de contato entre uma gota de um líquido e uma superfície sólida depende da relação entre as forças adesivas e as forças coesivas do líquido. Existem fatores importantes que afetam estas forças, como por exemplo a tensão superficial, a hidrofobicidade da superfície após a deposição das partículas sobre uma superfície sólida e a pressão da dissociação (CHAUDHURI & PARIA, 2014). Segundo SHAW (1975) se a gota repousa sobre uma superfície homogênea nivelada, forma-se um ângulo de contato de equilíbrio entre o líquido e a superfície sólida, assim, o líquido molhará completamente a superfície quando $\theta = 0^\circ$, caracteriza a superfície hidrofílica. A ausência completa de molhamento ocorrerá quando o $\theta = 180^\circ$, sendo considerada uma superfície hidrofóbica. Assim, a rugosidade das superfícies onde um fluido de corte deve atuar pode influenciar na molhabilidade e, portanto, no desempenho do fluido de corte no processo de usinagem. No entanto, a molhabilidade é um teste quase que estático e durante o processo de usinagem a ferramenta está em movimento. No microfresamento, a rotação da ferramenta é alta e tem a impedir o acesso de um fluido de corte. Por esta razão, o MQL é utilizado, pois a pressão do ar pode forçar o fluido a entrar na zona de corte. Nestas condições, é difícil correlacionar esta propriedade de um fluido com o seu desempenho no processo de microfresamento.

Existem ainda outras duas situações de molhabilidade. Quando uma superfície apresenta um ângulo de contato menor que 10° , ela está configurada de molhamento total, ao passo que em ângulos de contato maiores do que 150° a condição de molhamento é mínima. Considerando a água como líquido molhante, as superfícies em tais casos são denominadas super-hidrofílicas e super-hidrofóbicas, respectivamente (SACILOTTO, 2015; FOROOSHANI, et al, 2017). Assim, nota-se que os resultados gerados, como ilustram a Figura 5.4 com o ângulo de contato estático em 2 segundos após o contato inicial da gota na superfície, ângulos maiores que 10° para todos os fluidos de corte é considerada uma superfície hidrofílica, ou seja, parte da superfície

tem afinidade com os fluidos analisados, sendo assim, capaz de interagir com as moléculas. A molhabilidade assume uma importante propriedade que influencia a remoção de calor e a lubrificação durante o processo de usinagem.

5.1.4 Resultados dos Ensaios de Esclerometria Pendular

A Figura 5.6 mostra o comportamento da energia específica consumida nos riscos, na amostra do Aço Ferramenta H13, imersas há 3 mm, nos diversos fluidos de corte. O Fluido 1 foi o que obteve maior energia específica média durante o ensaio seguido, nesta ordem pelas condições a seco, óleo da copaíba, fluido 2 e o óleo de andiroba. No entanto, os valores de desvio padrão concluiu-se que a energia específica é estatisticamente a mesma para todas as situações.

O ensaio de esclerometria pendular apresenta velocidade de percussão de 4,1 m/s o que corresponde a aproximadamente 246 m/min (FRANCO, 1989; SALES et al, 2007). É uma velocidade que pode ser comparada às velocidades de corte em um processo de usinagem de aços com ferramenta de metal duro. Espera-se que o fluido de corte com maior capacidade de lubrificação resulta em menor energia específica. Considerando os valores médios, o óleo de andiroba, que tem a maior viscosidade entre os demais, resultou na menor energia em média. O Fluido 2, que tem a menor viscosidade e maior condutividade, resultou na maior energia em média. Segundo os autores Sales et al.(2007) e Araujo Junior (2013), uma parte significativa da energia requerida no ensaio de esclerometria pendular é transformada em energia térmica. Esse processo ocorre em volume muito pequeno, indicando um aumento repentino da temperatura. Esse aumento, por sua vez, contribui para tornar o material removido mais maleável, facilitando o processo de cisalhamento. Dessa forma, quando o fluido apresenta uma maior capacidade de resfriamento, ele dissipa mais calor e reduz a maleabilidade do material, resultando em uma maior exigência de energia para realizar o riscamento no corpo de prova.

Com a condição a seco, não há troca de calor com nenhum fluido, a não ser o ar. Isso faz com que somente a condução no material da amostra e a convecção no meio promovam trocas de calor, que resultou em um valor intermediário aos demais. O óleo da Copaíba e o fluido 2 apresentaram propriedades lubrificantes e refrigerantes mediadoras.

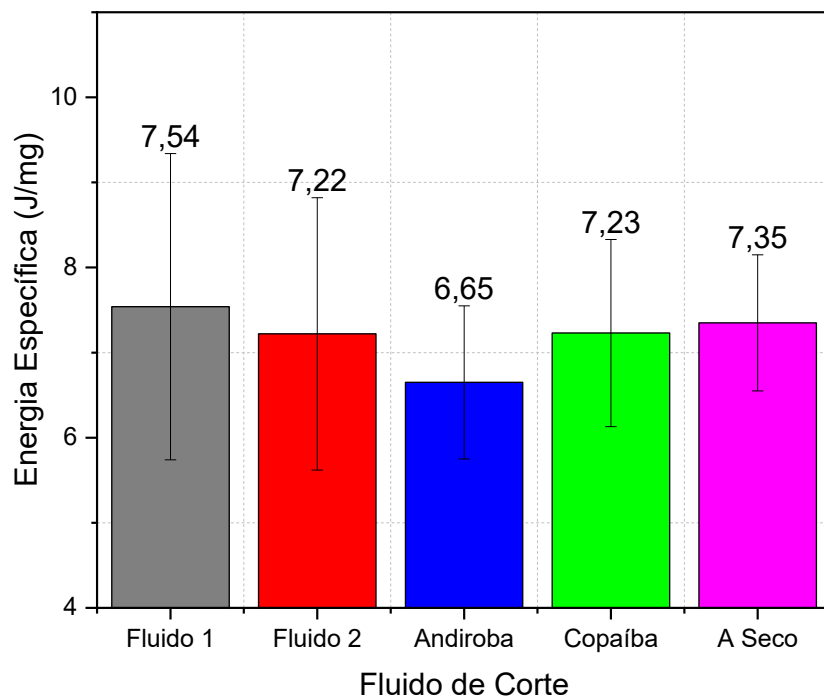
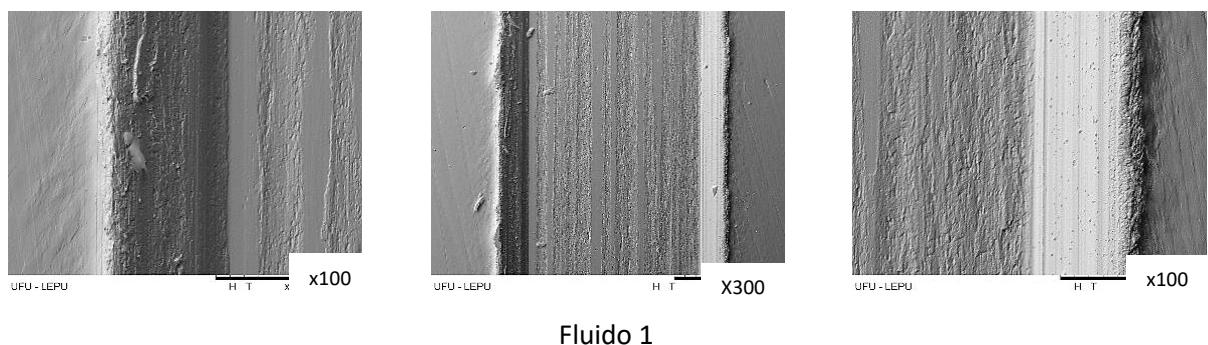


FIGURA 5.6: Energia Específica consumida nas amostras do Aço Ferramenta H13 submersas nos fluidos de corte.

Foram selecionadas três imagens capturadas no microscópio eletrônico de varredura, nas regiões do meio onde acontece maior perda da massa e nas bordas para cada condição: com o Fluido 2, Fluido 1, Andiroba, Copaíba e a seco mostrada na Figura 5.7.

Na análise qualitativa das imagens nota-se que o Fluido 2 resultou em um risco mais largo, assim como o óleo da copaíba e o Fluido 1. A andiroba por sua vez teve um risco com rebarba menor e mais estreito. A condição a seco, gerou um risco com maior profundidade, considerando as rebarbas laterais.



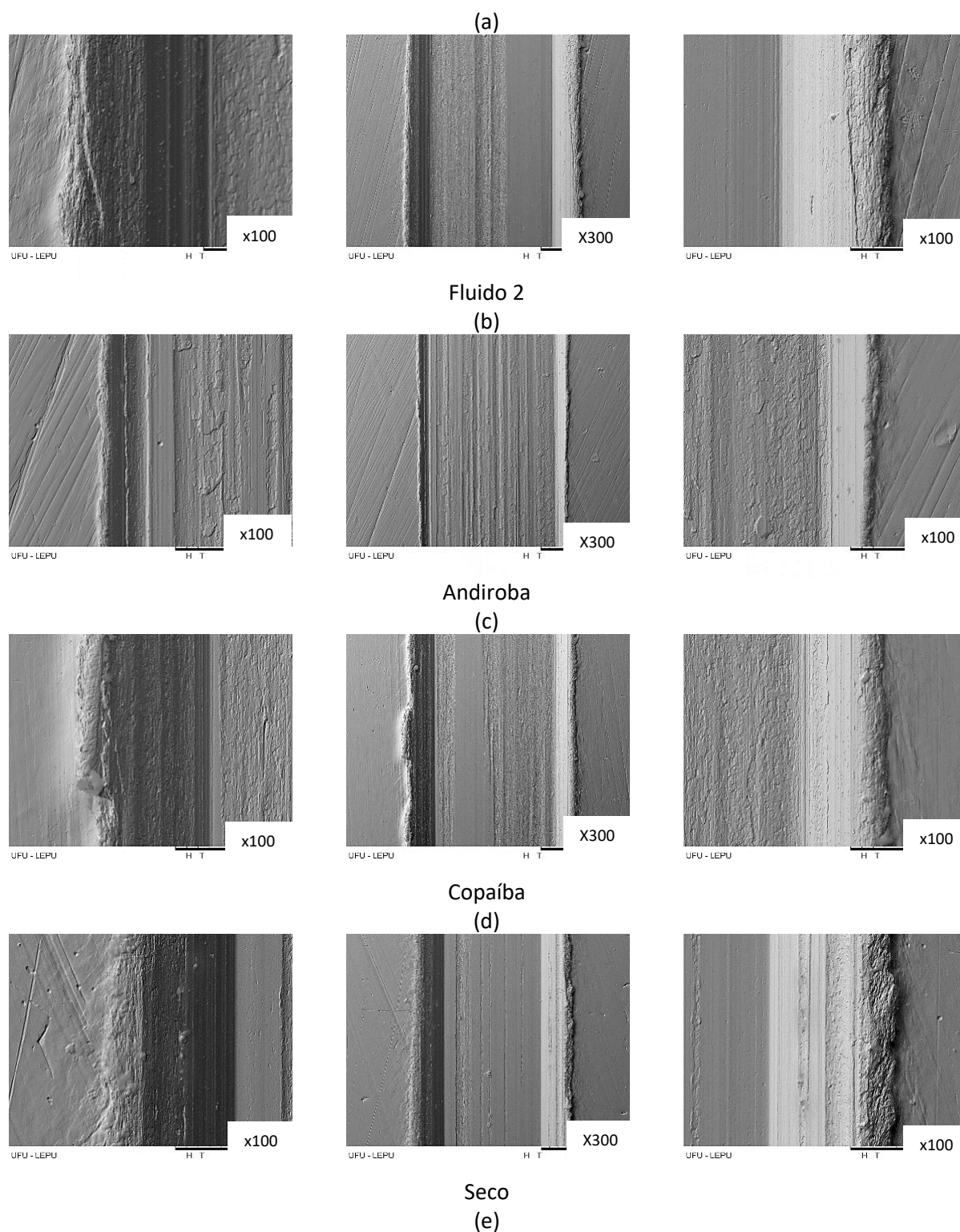
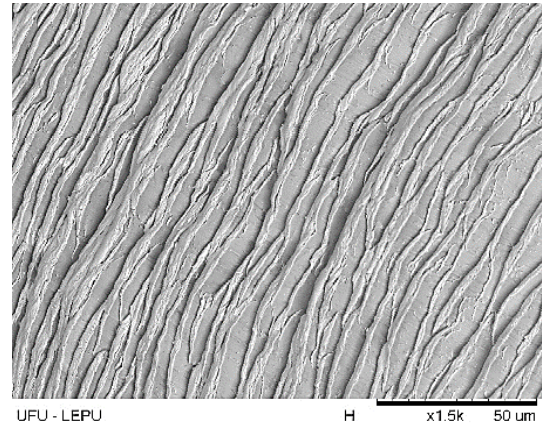
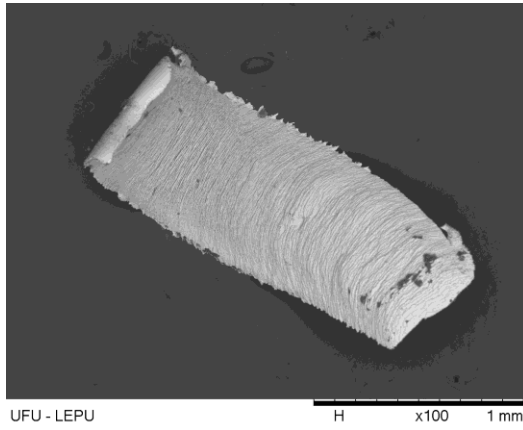


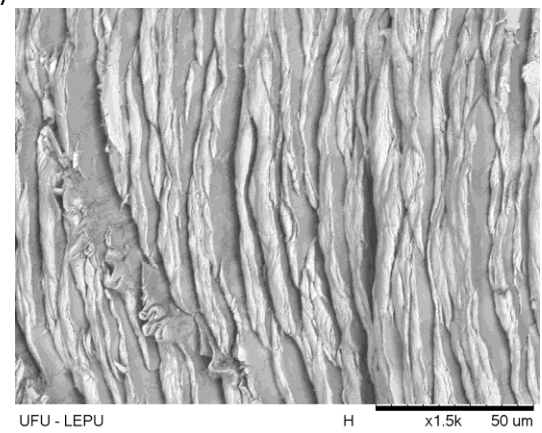
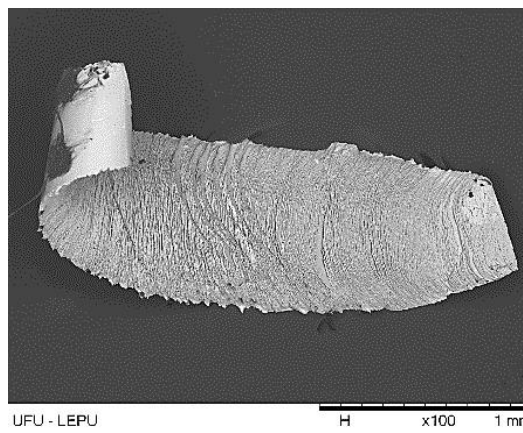
FIGURA 5.7: Vista superior e detalhe da borda do risco produzido com Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c), Copaíba (d) e a Seco (e).

As Figuras 5.8 mostram imagens dos cavacos gerados para cada ensaio. As análises das imagens a seguir, foram feitas de forma qualitativa. O óleo da Andiroba apresentou uma região com um sulco com menor profundidade que resultou em menor

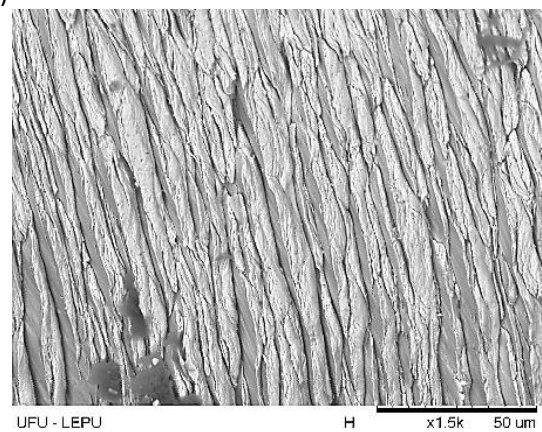
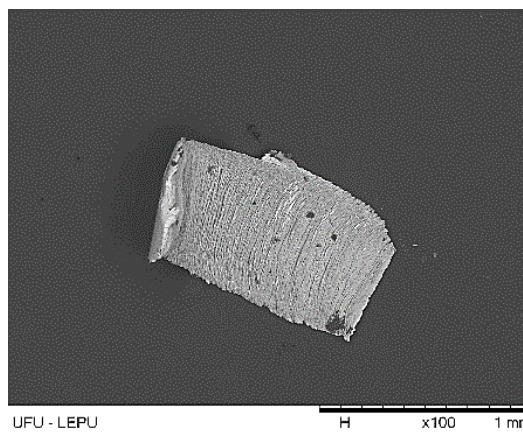
remoção de material e portanto, cavaco menor (Figura 5.8.c). Na condição a seco (Figura 5.8.e) nota-se uma profundidade de risco maior, gerando, portanto, um cavaco de maior comprimento. O Fluido 2 (Figura 5.8.a) produziu um cavaco com largura maior se comparado com os demais. O Fluido 1 (Figura 5.8.b) e a Copaíba (Figura 5.8.d) geraram cavacos com comprimentos similares. Nota-se que todos os cavacos formados tiveram uma morfologia lamelar.



Fluido 1
(a)



Fluido 2
(b)



Andiroba
(c)

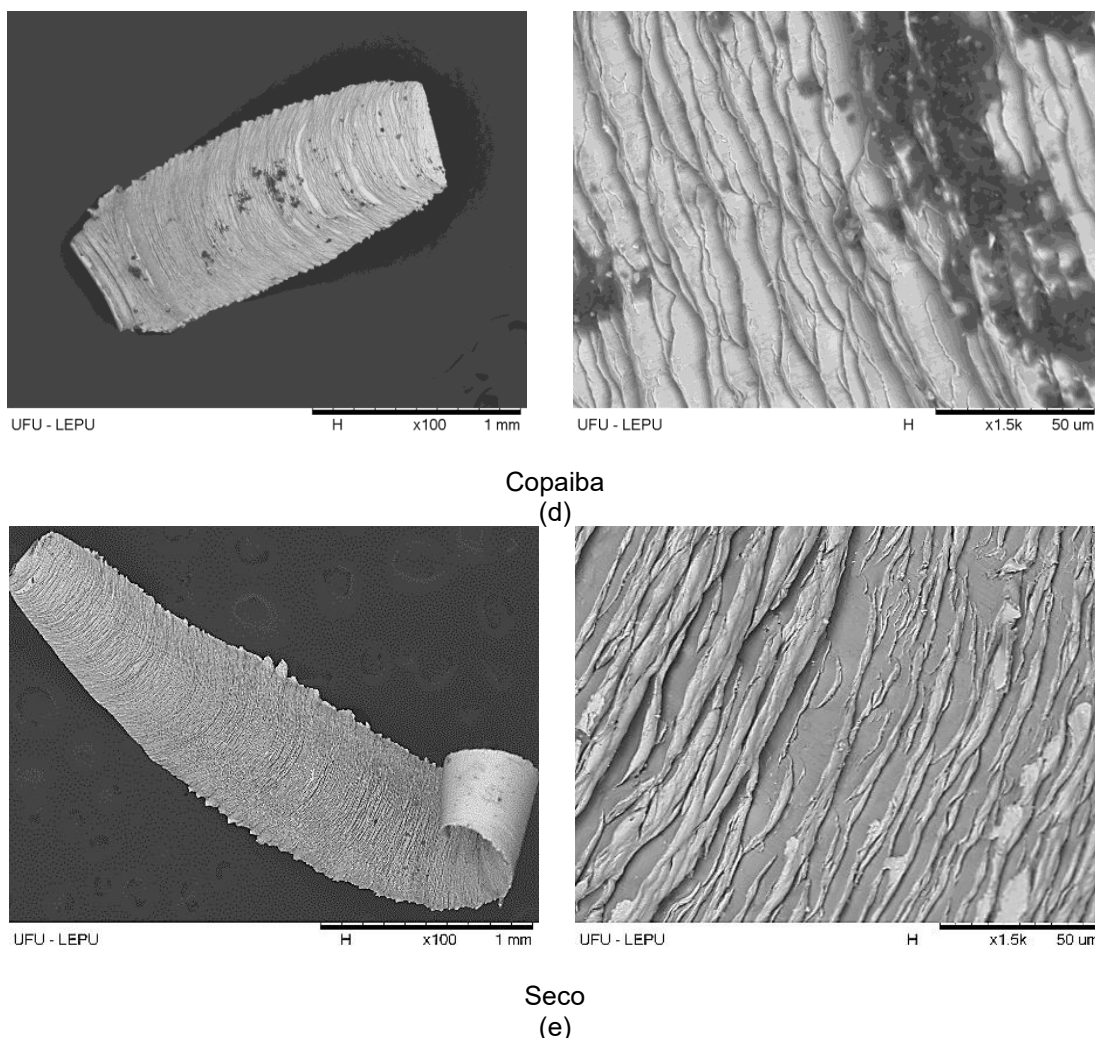


FIGURA 5.8: Vista do cavaco gerado com os fluidos: Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c), copaíba (d) e a Seco (e).

Os resultados de caracterização dos fluidos de corte, incluindo ar (seco), podem ser sumarizados na Tabela 5.2 a seguir que faz um ranqueamento dos fluidos em função da propriedade avaliada.

Tabela 5.2: Ranque dos valores das propriedades química-física dos fluidos de corte.

Fluido	Viscosidade	Condutividade	Molhabilidade	Esclerometria
Fluido 1	4	1	1	5
Fluido 2	2	3	4	2
Andiroba	1	2	2	1
Copaíba	3	4	3	3
Seco	NA	NA	NA	4

Sendo: NA – não avaliado. 1 é melhor e 5 pior. Para o teste de esclerometria foi levado em consideração apenas o resultado médio.

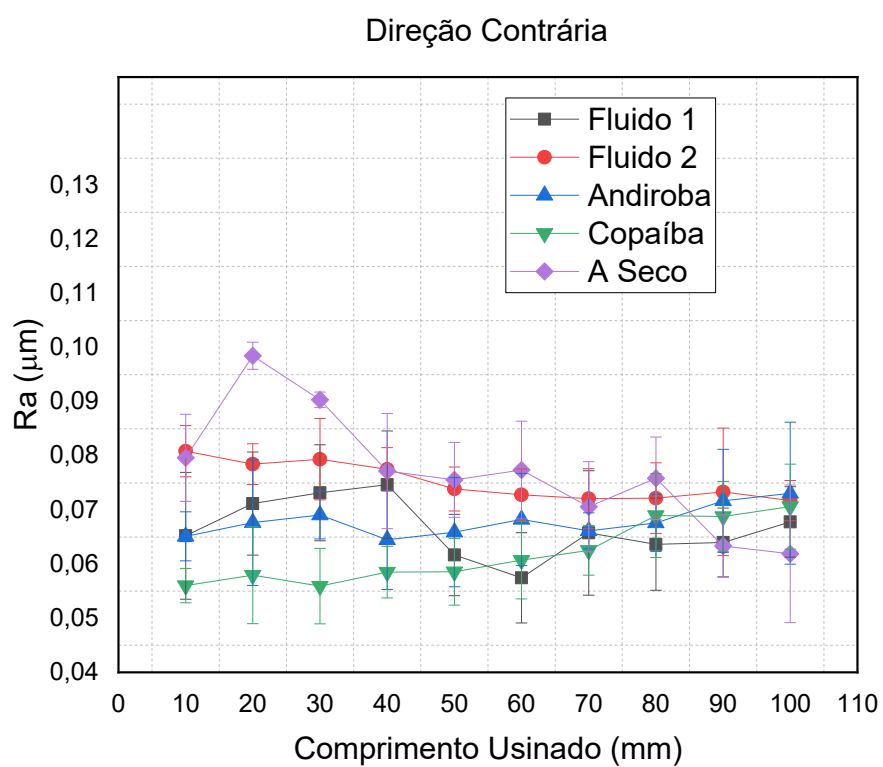
Os resultados sugerem então que, no geral, o óleo de andiroba teve o melhor desempenho. É inserido como estas propriedades poderiam afetar o desempenho de um fluido de corte, assim, as seções a seguir analisam o comportamento destes fluidos no processo de microfresamento.

5.2 QUALIDADE SUPERFICIAL

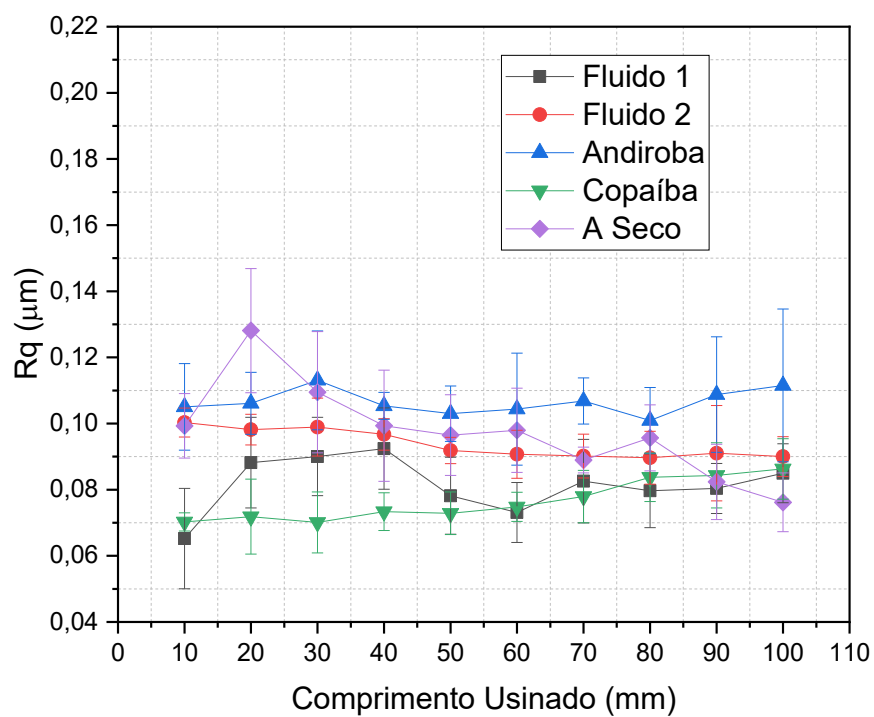
Nesta seção serão apresentados os resultados de rugosidade avaliados na superfície microfresada em relação ao comprimento usinado. A rugosidade foi medida em três regiões distintas para cada microcanal (início / meio / fim). Os fluidos foram aplicados em dois sentidos diferentes: na direção contrária à direção de avanço e na mesma direção de avanço da ferramenta.

5.2.1 Fluido Aplicado na Direção Contrária à Direção de Avanço da Ferramenta

A Figura 5.9 apresenta os resultados de rugosidade R_a e R_q por comprimento usinado para cada fluido de corte. É possível observar que a utilização de óleo de copaíba resultou em menores rugosidades até um comprimento de avanço usinado de 50 mm e em seguida tem uma tendência de aumentar. O óleo de andiroba, que tem a maior viscosidade, resultou em rugosidades mais constantes ao longo do comprimento usinado. O Fluido 1 exibiu um aumento inicial na rugosidade até o canal de 40 mm, seguido por uma diminuição no canal de 60 mm, encerrando-se próximo aos valores dos demais. Tanto o Fluido 2 quanto a condição a seco apresentaram inicialmente as maiores rugosidades, mas, ao final, ambos mostraram tendem a reduzir, sendo que a condição a seco gerou a menor rugosidade ao final dos 100 mm usinados. A condição a seco também foi a que resultou na maior rugosidade, apresentando assim, maiores valores comparados com as demais. Isso ocorre pelo fato da dispersão de energia do material e ao arredondamento das aresta no início do processo de microfresamento.



(a)

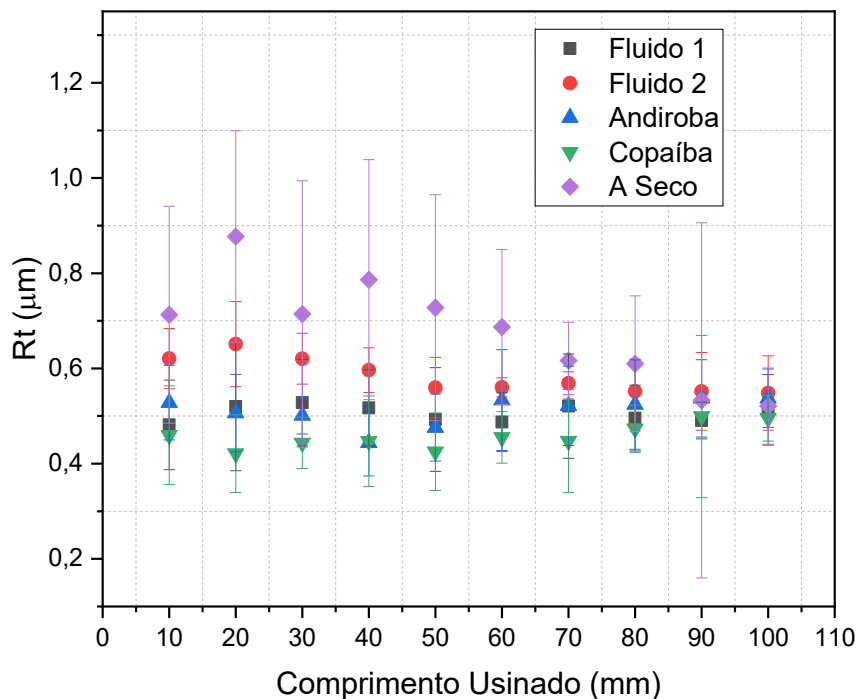


(b)

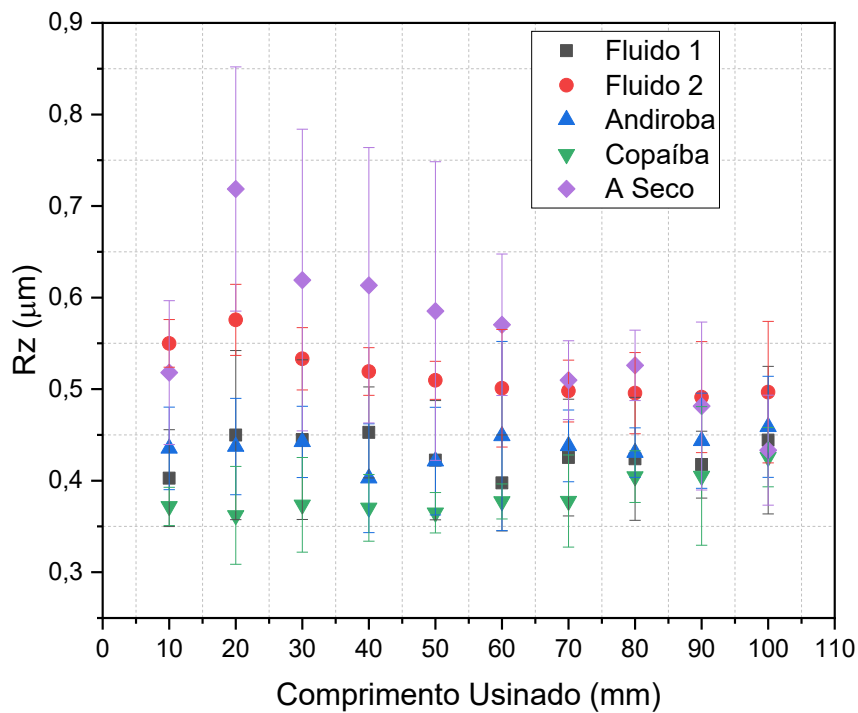
FIGURA 5.9: Rugosidade Superficial Ra (a) e Rq (b) ao longo do comprimento usinado para cada fluido de corte.

As variações de Ra e o Rq, estão aproximadamente entre $0,055\mu\text{m}$ e $0,100\mu\text{m}$ e $0,062\mu\text{m}$ e $0,130\mu\text{m}$, respectivamente. Apesar dos pequenos valores de rugosidade, a variação é em torno de 100% aproximadamente. São valores comparados a rugosidade de processos de retificação.

A Figura 5.10 apresenta os resultados das rugosidades total (Rt) a altura máxima do perfil (Rz) em função do comprimento usinado. A utilização de óleo de copaíba gerou os menores valores. Os valores médios de Rt variaram entre $0,4$ e $0,8\mu\text{m}$ sendo o menor valor gerado com o óleo da copaíba após comprimento usinado de 20 mm . Em relação à altura máxima do perfil (Rz), este variou entre $0,35$ e $0,85\mu\text{m}$.



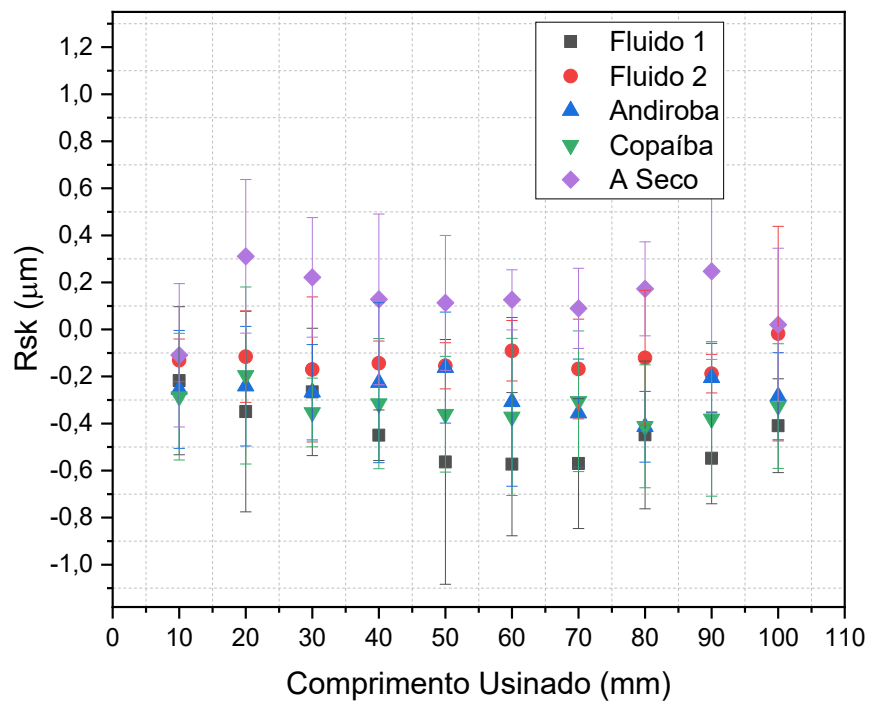
(a)



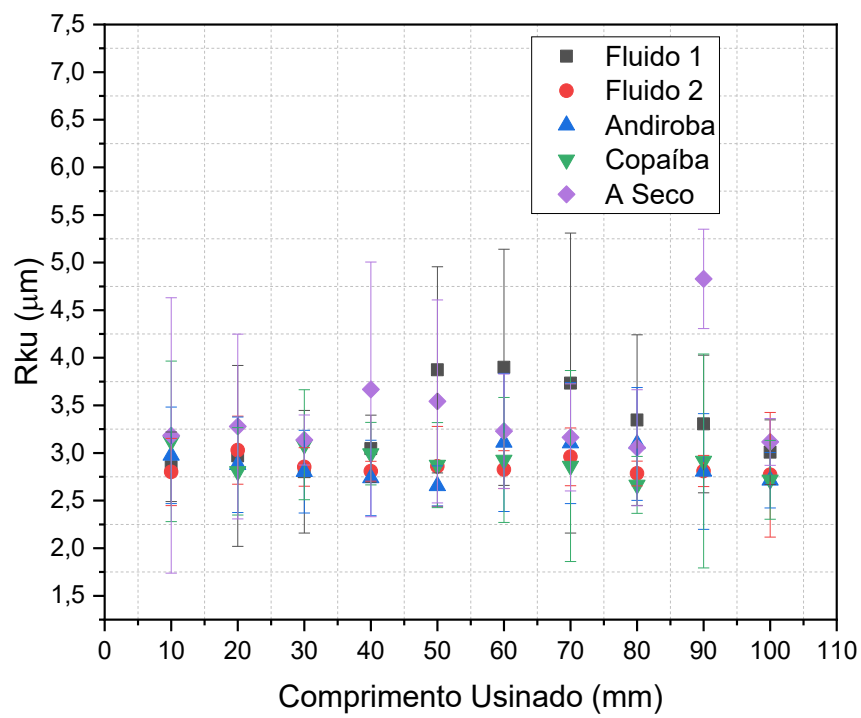
(b)

FIGURA 5.10. Rugosidade Superficial Rt(a) e Rz(b) ao longo do comprimento usinado para cada fluido de corte.

Na Figura 5.11, são apresentados os gráficos dos valores de assimetria (R_{sk}) e achatamento (R_{ku}) do perfil de rugosidade em função com comprimento usinado. Os maiores valores de R_{sk} foram obtidos na condição a seco e os menores valores quando se utilizou o Fluido 1, com variação entre $-0,6$ e $+0,3\mu\text{m}$. Os valores da rugosidade R_{ku} variaram entre $2,5$ e $4,6\mu\text{m}$ e os maiores valores foram obtidos com o Fluido 1 entre 50 e 70 mm de comprimento usinado.



(a)



(b)

FIGURA 5.11: Rugosidade Superficial $R_{sk}(a)$ e $R_{ku}(b)$ ao longo do comprimento usinado para cada fluido de corte.

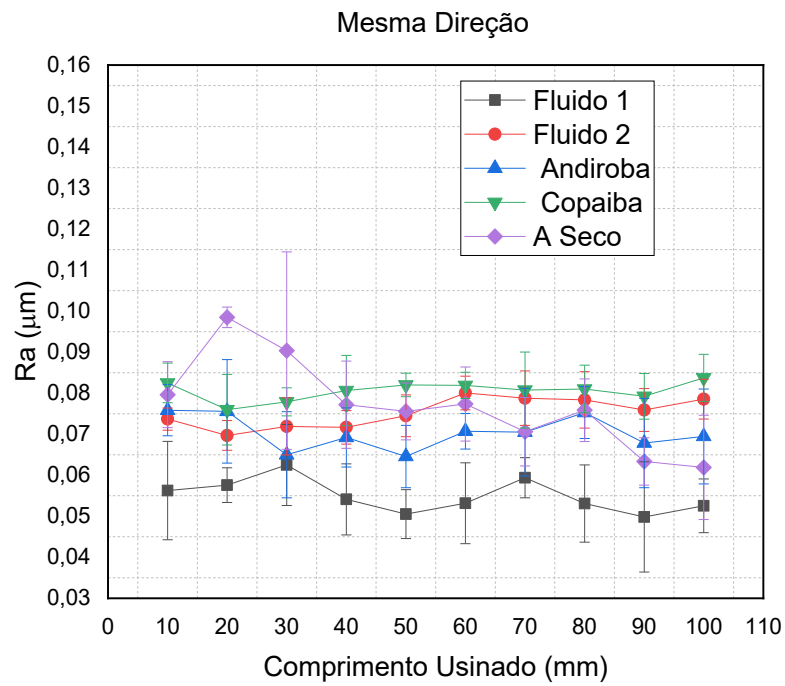
Nenhum destes dois parâmetros avaliam a rugosidade da superfície, mas a forma do perfil de rugosidade. O parâmetro R_{sk} avalia a simetria do perfil de enquanto R_{ku} avalia o achatamento do perfil. Valores positivos de R_{sk} indicam picos mais achatados do que os vales. Valores positivos de R_{ku} indicam picos e vales mais pontiagudos. Assim, de uma maneira geral, o perfil de rugosidade para a condição a seco e quando se utiliza o Fluido 1 se destacam em relação às demais condições de lubrificação.

5.2.2 Fluido Aplicado na Direção de Avanço da Ferramenta

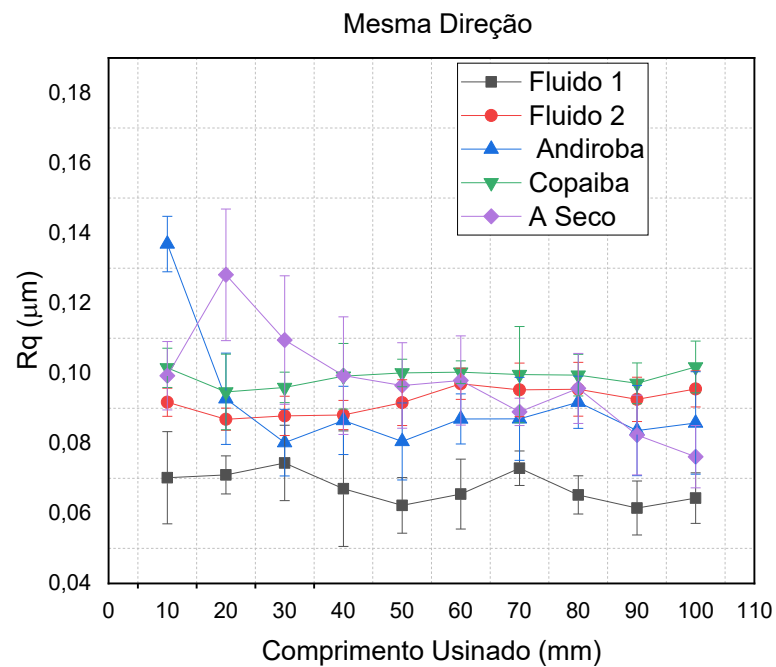
A Figura 5.12 apresenta os resultados das medições de rugosidade R_a e R_q por comprimento usinado para cada fluido de corte, quando o fluido foi aplicado na direção de avanço e compara com a condição a seco.

Os valores da rugosidade R_a variam entre 0,05 e 0,11 μm . O Fluido 1 proporciona os menores valores. Desta vez, foi o Fluido 2 que apresentou valores praticamente constantes ao longo de todo o comprimento usinado. Quando se utiliza o óleo de andiroba a rugosidade diminui até um comprimento de usinagem de 30 mm, a partir daí se mantém praticamente constante. A rugosidade com o óleo de copaíba é ligeiramente superiores às demais condições, exceto para usinagem a seco em apenas duas ocasiões. A maior rugosidade foi obtida para a condição a seco, após 20 mm (segundo canal), seguido por uma diminuição, situando-se entre os valores dos demais fluidos de corte.

As rugosidades são similares para as duas direções de aplicação de fluido de corte.



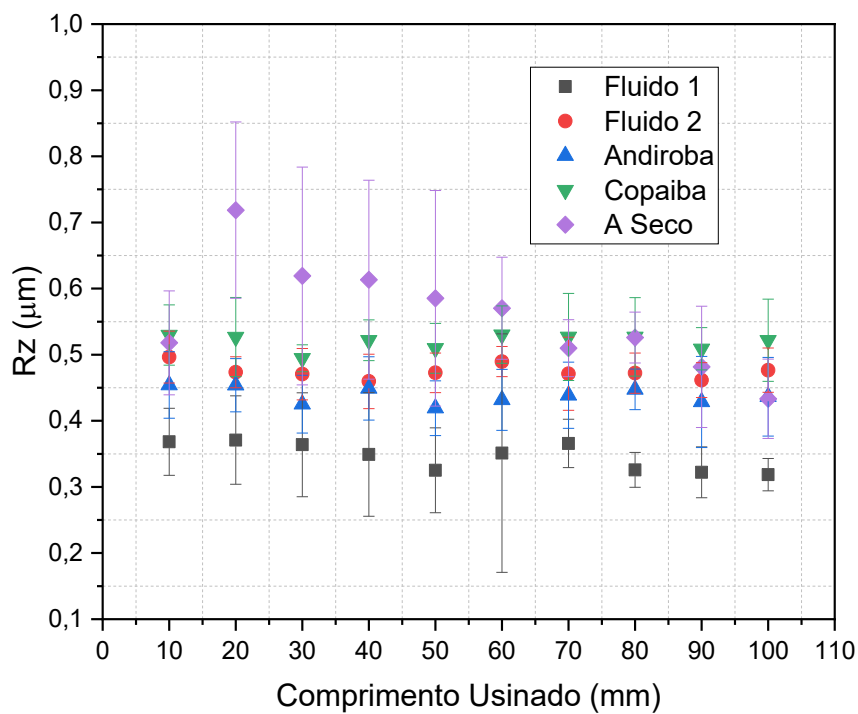
(a)



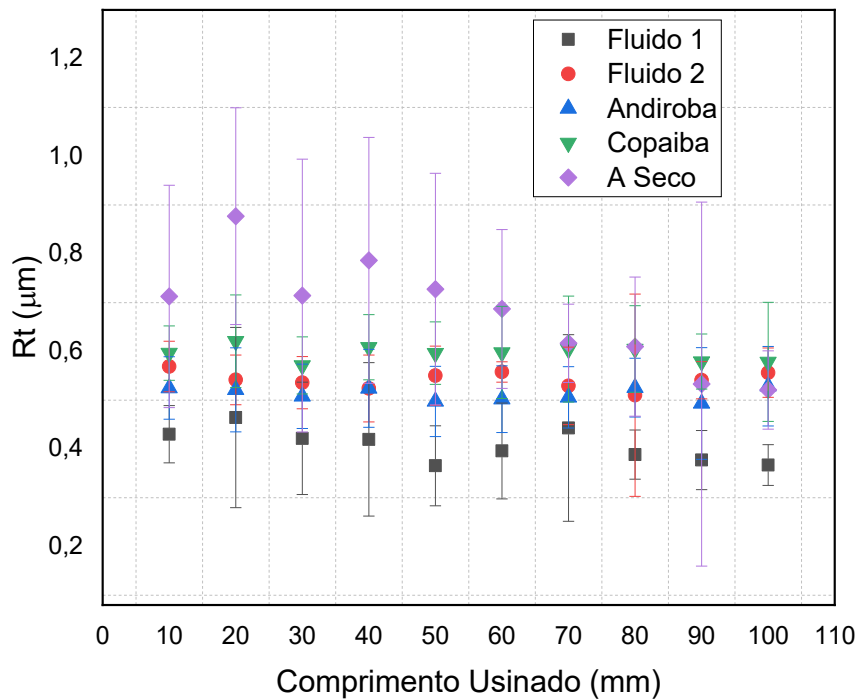
(b)

FIGURA 5.12: Rugosidade Superficial Ra (a) e Rq (b) ao longo do comprimento usinado para cada fluido de corte.

Na Figura 5.13 são apresentados os resultados das rugosidades Rz e Rt em função do comprimento usinado. Os valores de Rz variam entre 0,3 e 0,7 μm . Os valores da rugosidade total (Rt) ficaram entre 0,35 a 0,86 μm . A condição a seco resultou em maiores valores dos dois parâmetros e com redução como comprimento usinado, se igualando ao final às demais condições, com exceção do Fluido 1, que resultou nos menores valores de rugosidade.



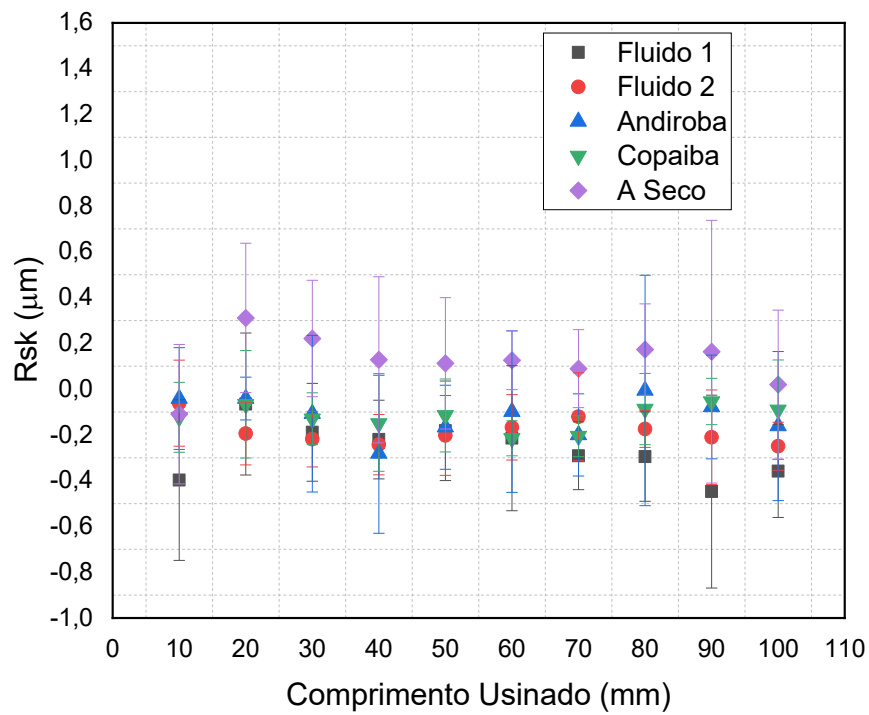
(a)



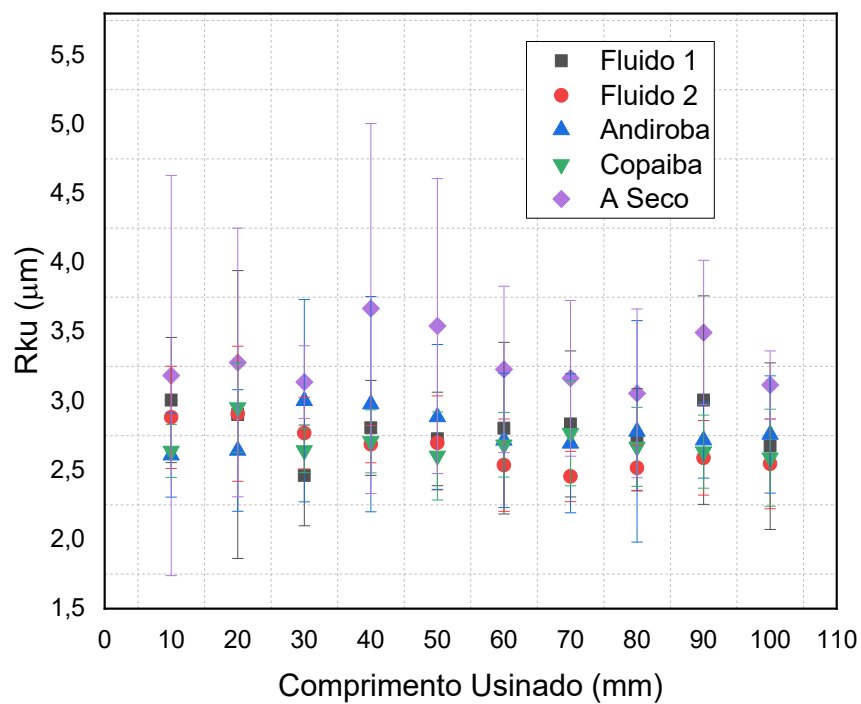
(b)

FIGURA 5.13: Rugosidade Superficial Rz(a) e Rt(b) ao longo do comprimento usinado para cada fluido de corte.

Na Figura 5.14, são apresentados os resultados dos valores de assimetria (R_{sk}) e achatamento (R_{ku}) do perfil de rugosidade para todas as condições de lubrificação. Os valores de R_{sk} ficaram entre $-0,52$ e $0,3 \mu\text{m}$ e R_{ku} entre $2,5$ e $3,75 \mu\text{m}$. Para os dois parâmetros, a condição a seco resultou em maiores valores.



(a)



(b)

FIGURA 5.14: Rugosidade Superficial Rsk(a) e Rku(b) ao longo do comprimento usinado para cada fluido de corte.

Para verificar a influência dos fluidos de corte e da direção de aplicação de fluido, foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos. A análise foi realizada em relação ao parâmetro de rugosidade Ra. Foi realizada a análise de variância (ANOVA) com três fatores (fluido de corte, direção de aplicação de fluido e comprimento usinado), sendo quatro níveis para o fluido de corte, dois níveis para a direção de aplicação e dez níveis para o comprimento usinado. O intervalo de confiança adotado foi de 95%. A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos. De acordo com os resultados, o fluido de corte e a direção de aplicação tiveram influência estatística na rugosidade (Ra). A interação entre o fluido de corte, a direção de aplicação e o comprimento usinado também são influentes. O coeficiente R^2 para o modelo obtido foi de 50,35%.

TABELA 5.3: Resultados da ANOVA para a rugosidade superficial

Fator	f-valor	p-valor
Fluido de Corte	19,403	1,30e-10*
Direção do Bocal	6,398	0,0125
Comprimento Usinado	1,083	0,2998
Fluido de Corte * Direção do Bocal	29,735	5,31e-15*
Fluido de Corte * Comprimento Usinado	3,246	0,0238
Direção do Bocal * Comprimento Usinado	0,109	0,7414
Fluido de Corte * Direção do Bocal * Comprimento Usinado	3,067	0,03

A Figura 5.15 ilustra a influência do comprimento usinado na rugosidade Ra para cada condição de lubrificação. Observa-se que a direção de aplicação do fluido não tem influência estatística quando se utiliza o óleo da andiroba. Comportamento diferente do óleo da copaíba, que resulta em maior rugosidade quando o fluido é aplicado na mesma direção e menor quando aplicado na direção contrária, sendo esta última condição muito influente na rugosidade Ra. O Fluido 1, por sua vez, exibe padrões opostos à copaíba, apresentando maiores rugosidades na direção contrária e menores na mesma direção. O Fluido 2 demonstra um comportamento peculiar em relação aos demais fluidos. A rugosidade diminui com o comprimento usinado quando se aplica o fluido na direção contrária e aumenta quando se aplica na mesma direção. As rugosidades para as duas condições se igualam na metade do comprimento total usinado (50 mm). Os resultados permitem concluir que o fluido de corte tem influência

estatística na rugosidade Ra. Além disso, a direção de aplicação, o comprimento usinado e a interação entre eles também tem influência estatística.

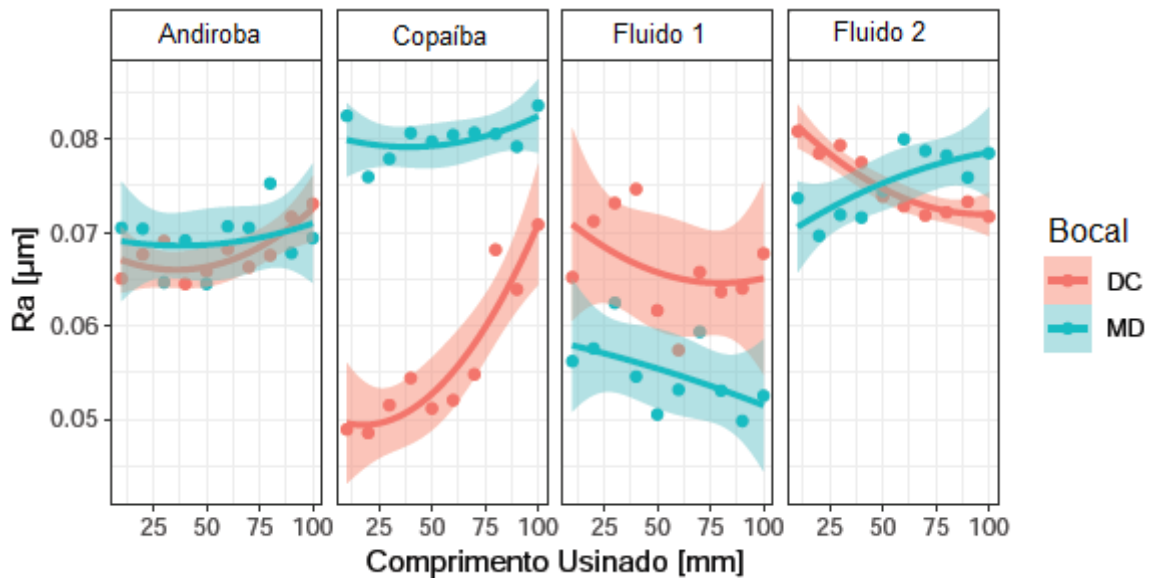


FIGURA 5.15: Influência estatística dos parâmetros de rugosidade ao longo do comprimento usinado.

A Figura 5.15, observa-se que a copaíba resultou em maiores níveis de rugosidade. Em geral a aplicação do Fluido 1 na mesma direção do avanço da ferramenta gerou as menores rugosidades, além da diminuição de Ra com o comprimento usinado. Apesar das rugosidades serem menores quando se aplica o óleo de copaíba, a variação com o comprimento usinado é grande e, ao final dos 100 mm a rugosidade supera os valores para o Fluido 1. O efeito dos fluidos de corte podem ser melhor visualizados nos gráficos da Figura 5.16. Percebe-se que no início as menores rugosidades são obtidas quando se aplica o óleo da copaíba na direção contrária e as maiores rugosidades quando se aplica na mesma direção. Segundo estes resultados, considerando que a vida da ferramenta é 100 mm usinados, a melhor combinação seria o Fluido 1 aplicado na mesma direção do avanço da ferramenta. Os resultados também sugerem que o óleo da copaíba, por ter uma maior influência na rugosidade, pode ser o mais influente no desgaste das ferramentas.

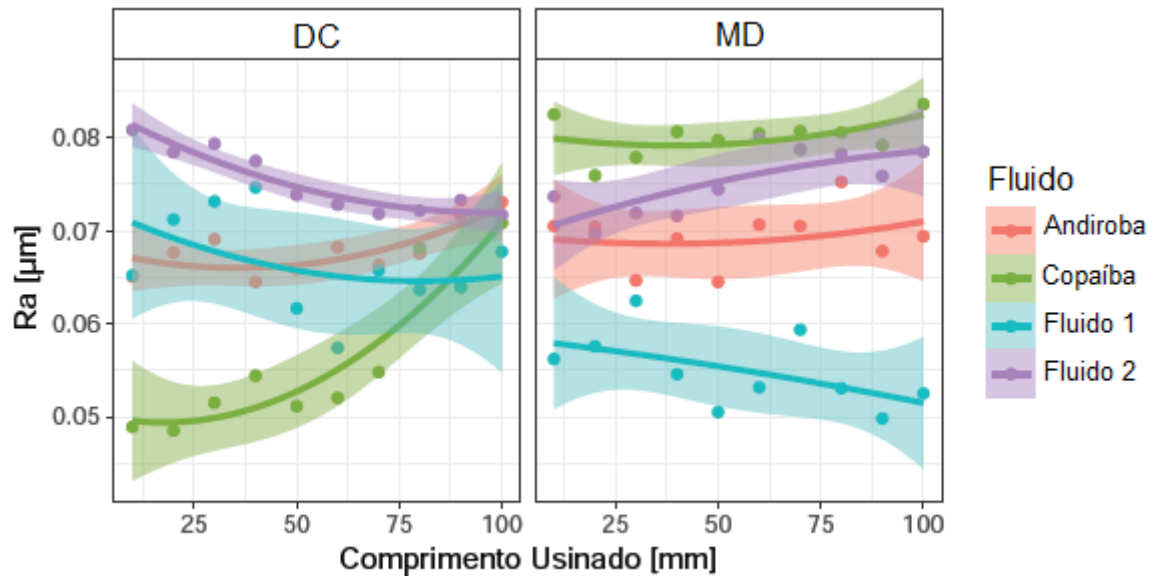


FIGURA 5.16: Influência estatística dos parâmetros de rugosidade em relação à direção do bocal.

5.3 DESGASTE DA FERRAMENTA

5.3.1 Desgaste da Ferramenta com Aplicação do Fluido de Corte na Direção Contrária à Direção de Avanço

Para cada condição de lubrificação foi feita a medição do desgaste da ferramenta através da variação do diâmetro da microfresa. As microfresas também foram analisadas no MEV após a usinagem.

A Figura 5.17 contém as imagens de topo (superfície secundária de folga) das ferramentas novas e após a usinagem de 100 mm. Visualmente, observa-se que as cunhas cortantes, além do desgaste, perdem parte do revestimento (indicado por setas vermelhas). Alguns trabalhos consideram esta região também como parte do desgaste (SILVA & Da SILVA, 2019; ZIBEROV et al., 2020).

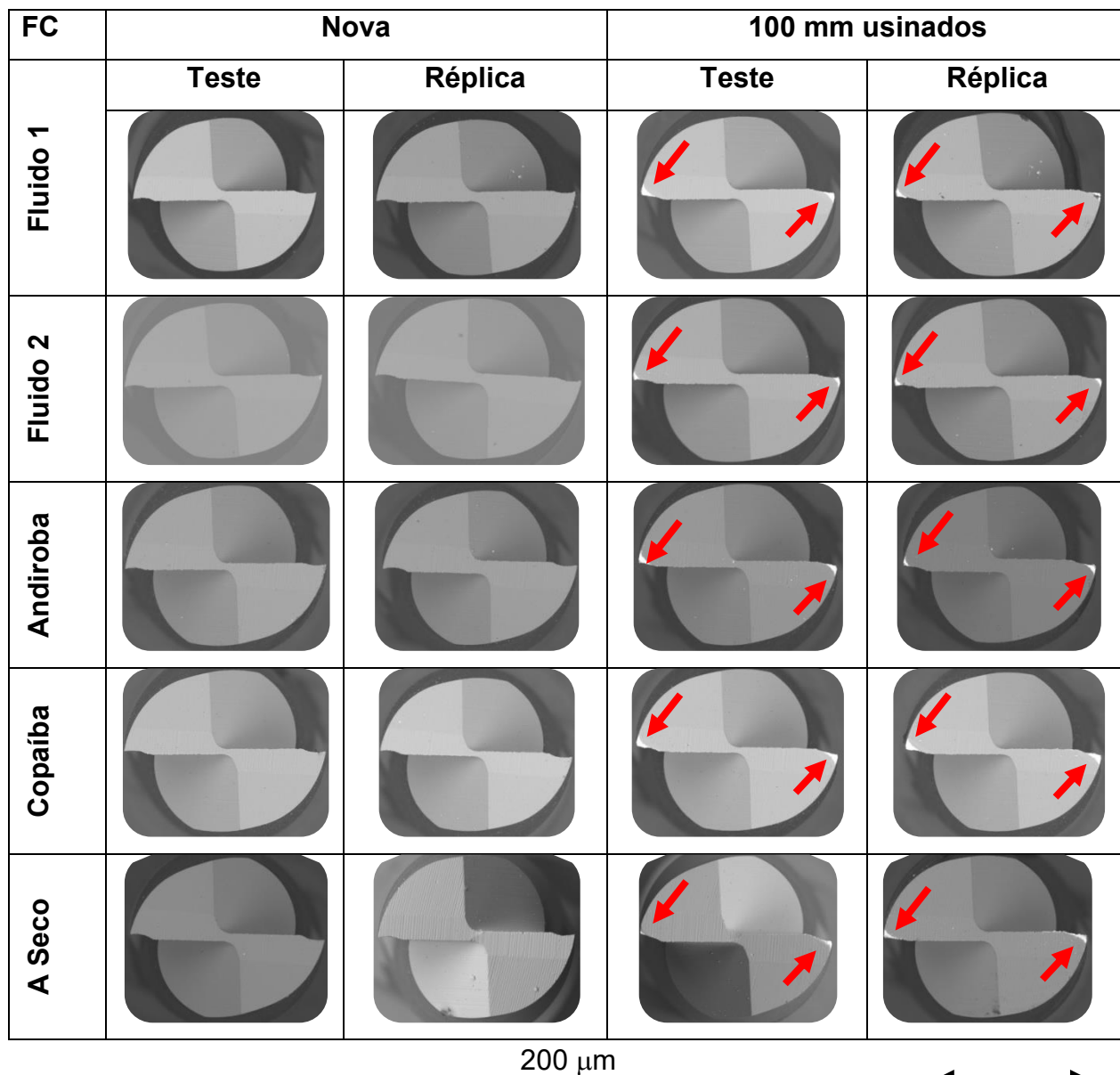


FIGURA 5.17: Imagens de topo novas e usinadas após 100 mm de comprimento usinado de teste e réplica com os Fluidos de Corte (FC): Fluido 1, Fluido 2, Andiroba, Copaíba e a Seco.

A Figura 5.18 mostra o resultado do desgaste medido através do percentual de redução do diâmetro e o valor absoluto nos diferentes fluidos de corte. A redução do diâmetro ficou entre 4,0 e 13,0 μm . Observa-se que a aplicação do Fluido 1 resultou no menor desgaste, enquanto a condição a seco no maior. Os resultados para o Fluido 1, Fluido 2, óleo de copaíba e andiroba foram 64,94%, 56,02%, 54,27% e 26,51% menores que a seco, respectivamente. Desta forma, em termos de desgaste, o Fluido 1 teve o melhor desempenho. O Fluido 2 e o óleo de copaíba tiveram resultados similares.

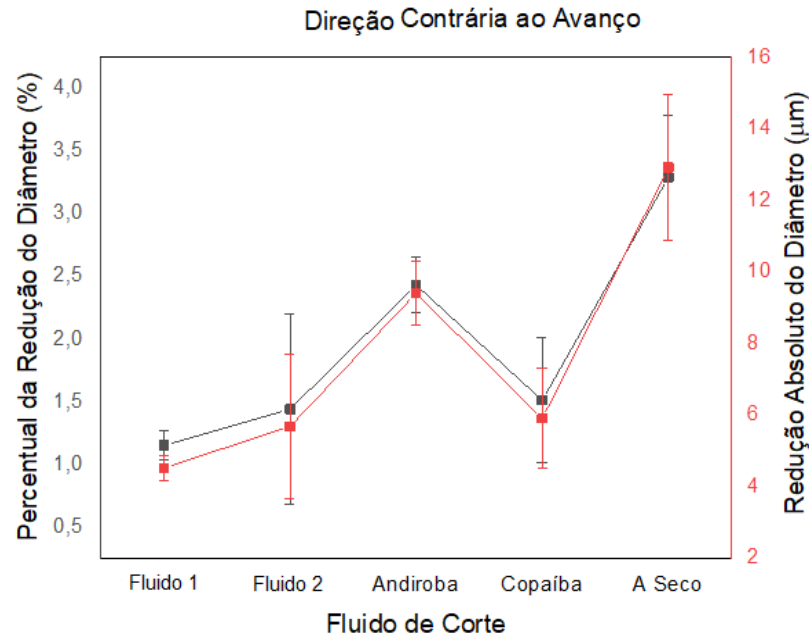


FIGURA 5.18. Resultado de desgaste médio e percentual de redução para as diferentes condições com o bocal na direção contrária ao avanço.

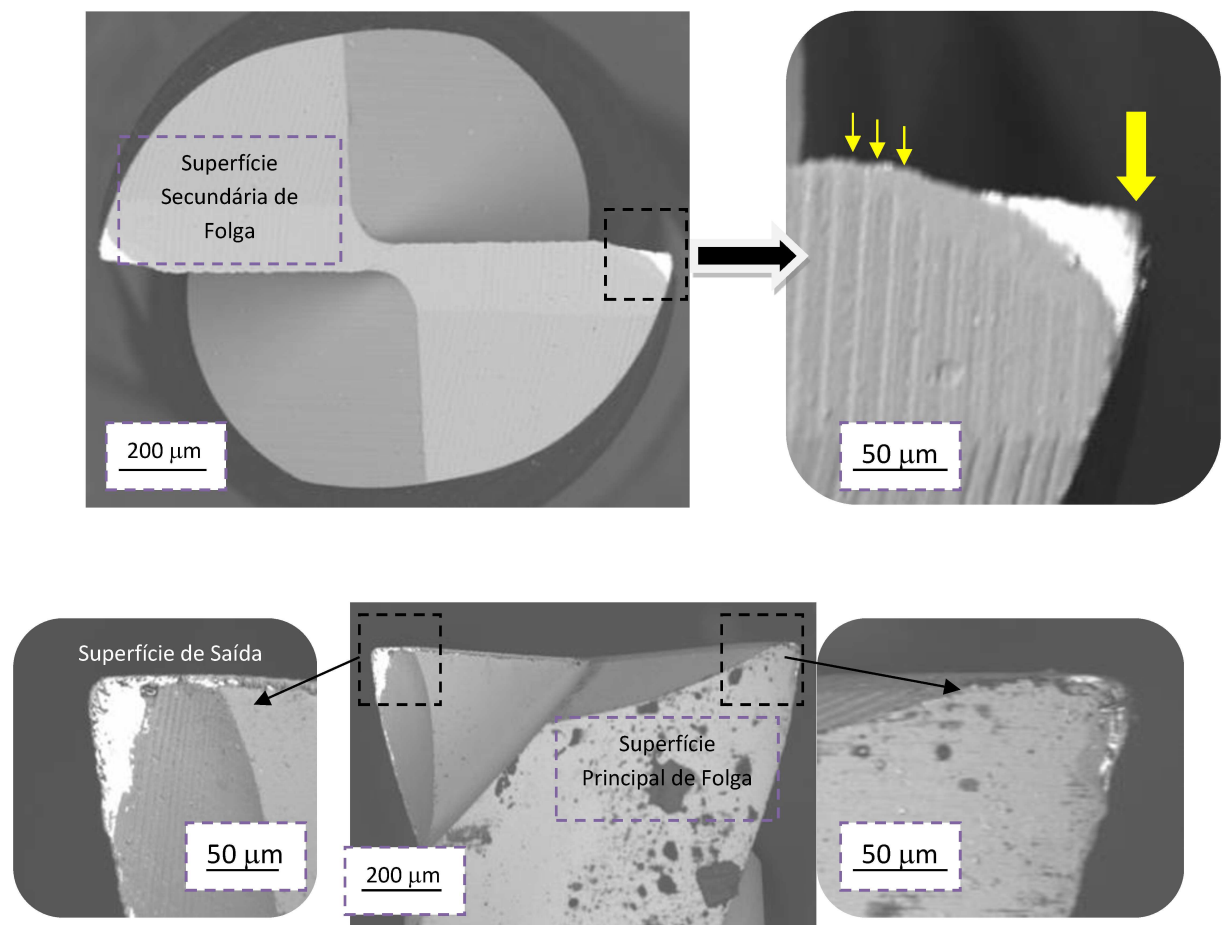
As imagens de MEV foram utilizadas para identificação das formas de desgaste. A Figura 5.19 mostra as imagens da superfície de folga, principal e secundária e a superfície de saída, para todas as condições.

Devido à quantidade de imagens foi selecionada a ferramenta que visualmente obteve maior desgaste. Nota-se que em todas as ferramentas, ocorreu um arredondamento da cunha cortante (como ilustra, na Figura 5.19 a seta amarela). Isso ocorre devido o arredondamento na ponta causada pelo contato entre a microfresa e a peça usinada (SHAW, 1986). Essa forma de desgaste foi recorrente em outros trabalhos de microfresamento, como no microfresamento da liga Ti-6Al-4V com aplicação de MQL (ZIBEROV et al., 2020), aço inoxidável ABNT 316L (GOMES, 2022) e Inconel 718 (OLIVEIRA, 2019).

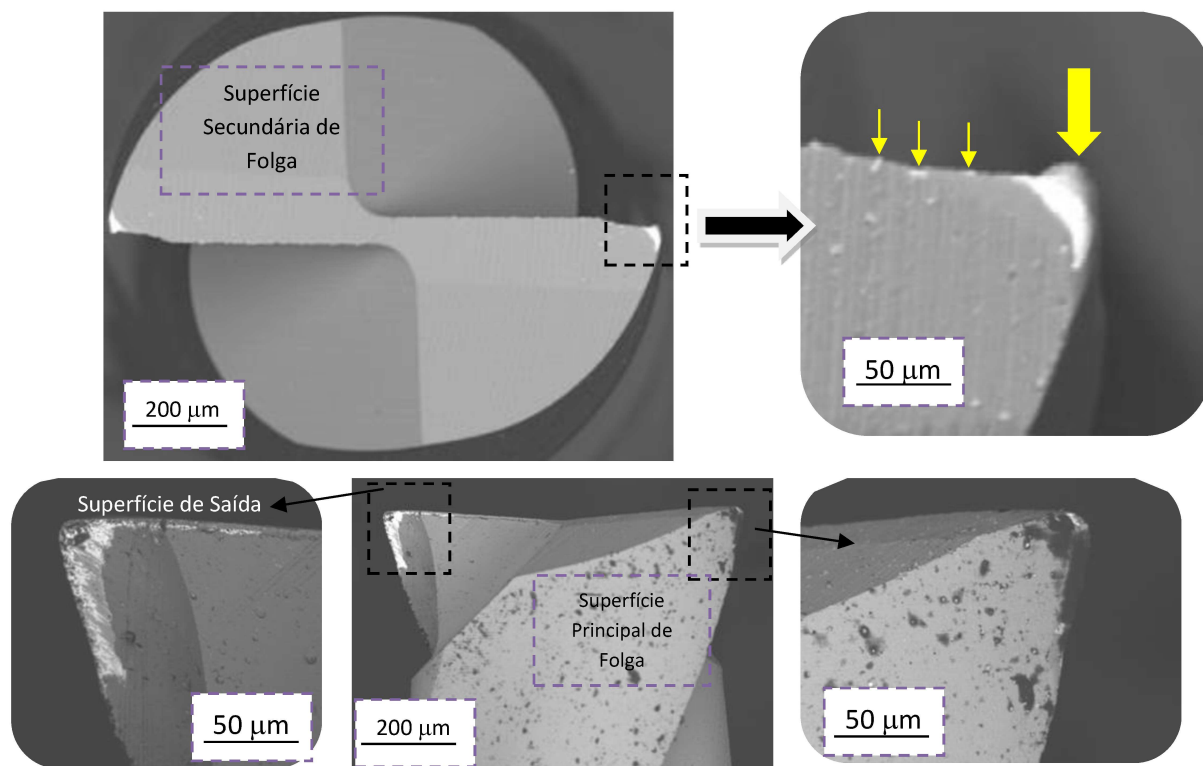
Não foi observado a presença de aresta postiça de corte (APC), devido à utilização de fluidos de corte. Além do arredondamento da cunha de corte, identificou-se o tradicional desgaste de flanco, sendo mais evidente para as todas as condições utilizando fluido, independente do fluido de corte. O aço ABNT H13 possui estrutura cristalina composta de mais de uma fase, ou seja, não é isotrópico e sob o ponto de vista microscópio cada fase presente possui dureza e tamanho de grãos diferentes,

sugerindo a remoção do material de forma não uniforme (Attanasio et al., 2013 e Uhlmann et al., 2013).

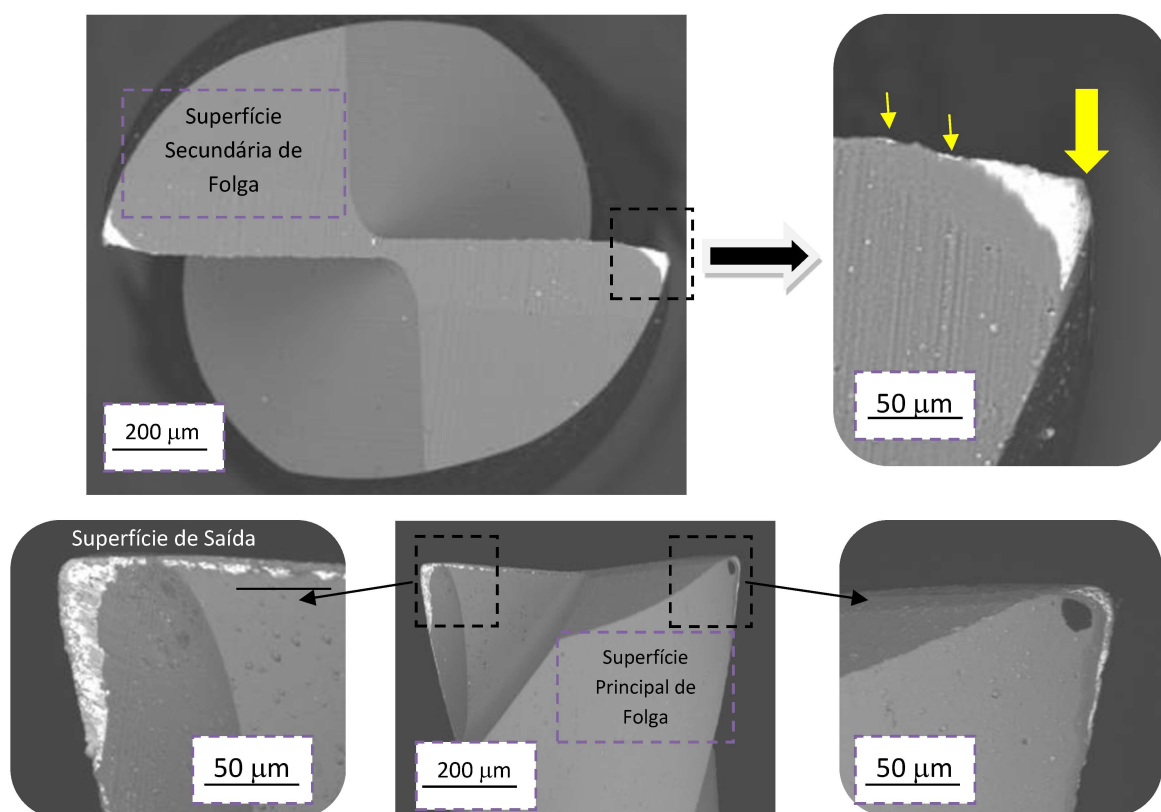
Na figura 5.19 é possível notar os sulcos alinhados na direção do fluxo do material, assim como o desgaste no flanco, apontado pelas setas. É importante destacar que a ferramenta apresenta marcas do processo de retificação usado na sua fabricação, as quais estão sob o revestimento.



(a) Fluido 1



(b) Fluido 2



(c) Andiroba

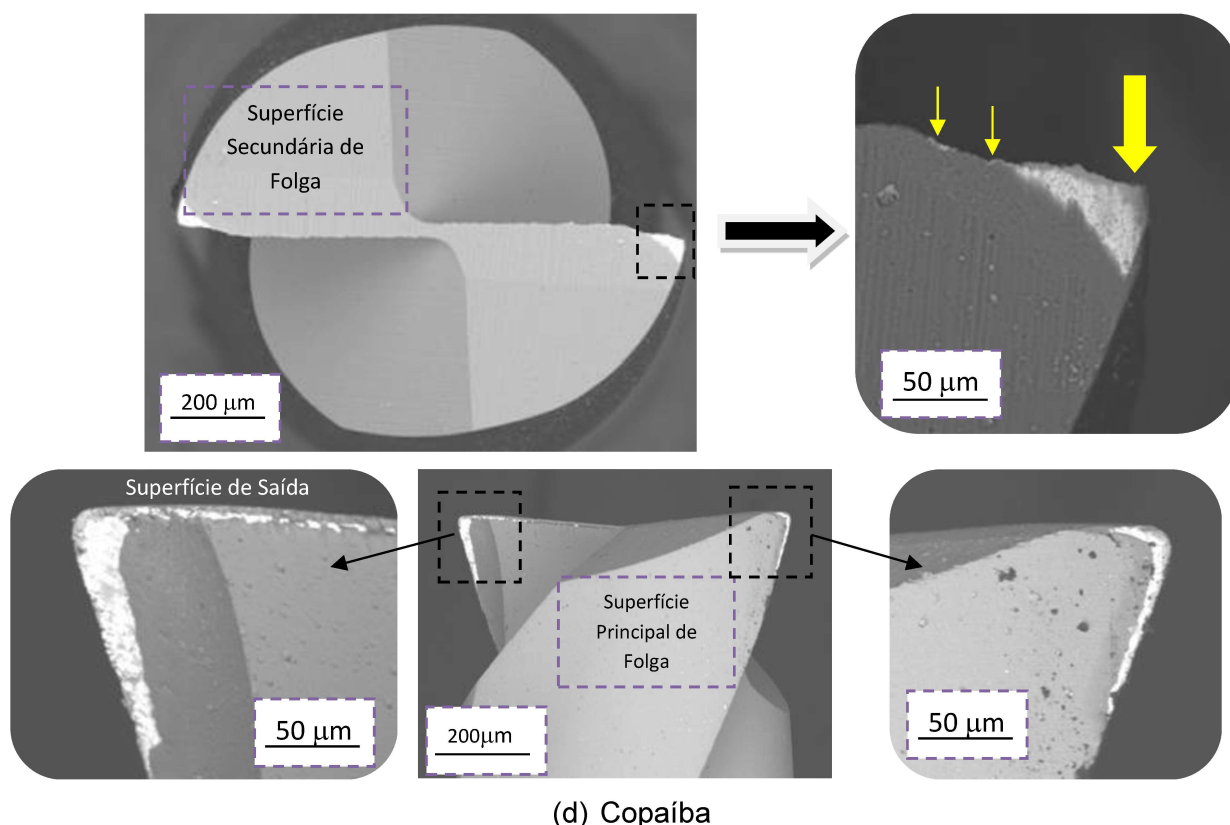


FIGURA 5.19: Imagens obtidas pelo MEV da superfície secundária, primária de folga e superfície de saída após 100 mm de comprimento usinado com aplicação: Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c) e a Copaíba (d).

Na Figura 5.20 observa-se o desgaste na condição a seco após 100 mm de comprimento usinado. Além de arredondamento da cunha cortante, observa-se também a presença de material aderido, conforme indicado pelas setas amarelas. Isso pode ser uma evidência de formação de APC. Também é observado um considerável desgaste de flanco, tanto na superfície principal quanto na secundária de folga.

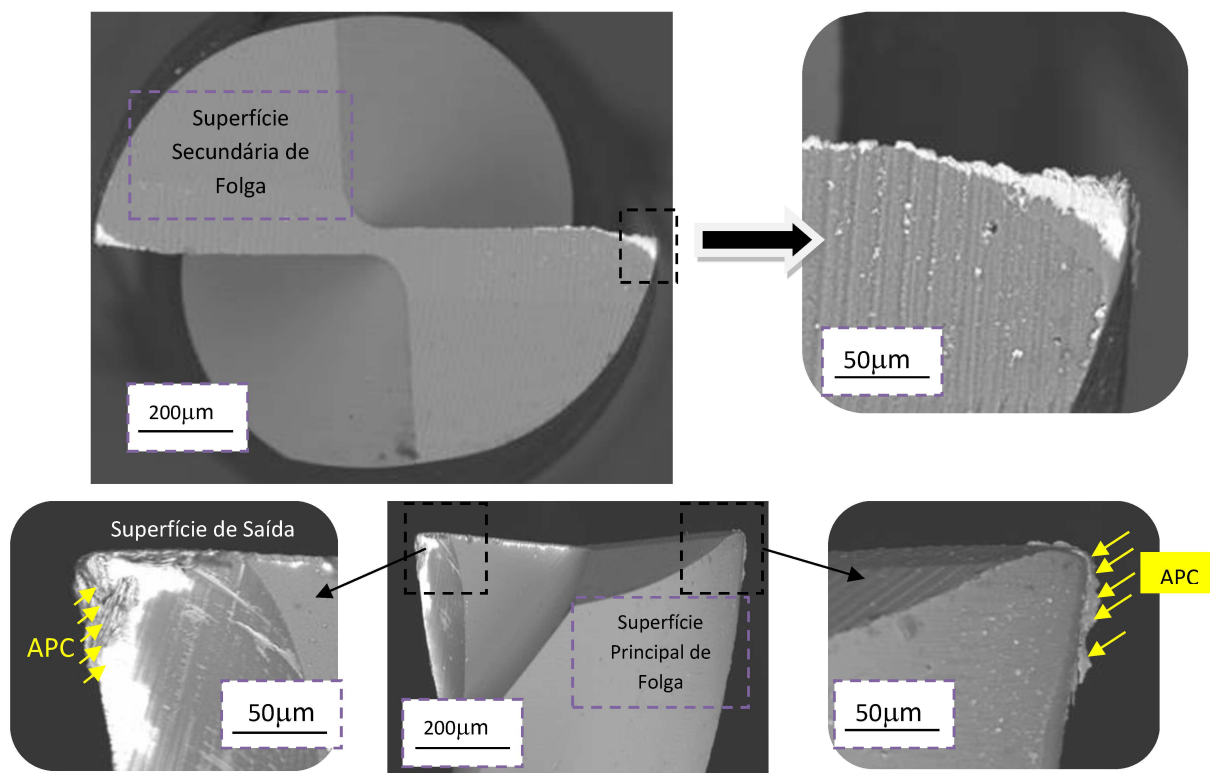


FIGURA 5.20. Imagens obtidas pelo MEV da superfície secundária e principal de folga após 100 mm de comprimento usinado à Seco.

5.3.2 Desgaste da Ferramenta com Aplicação de Fluido na Direção de Avanço

A Figura 5.21 contém as imagens topo obtidas através do MEV das ferramentas novas e após a usinagem dos 10 canais (100 mm de comprimento). O destacamento do revestimento é indicado pelas setas vermelhas.

FC	Nova		100 mm usinados	
	Teste	Réplica	Teste	Réplica
Fluido 1				
Fluido 2				

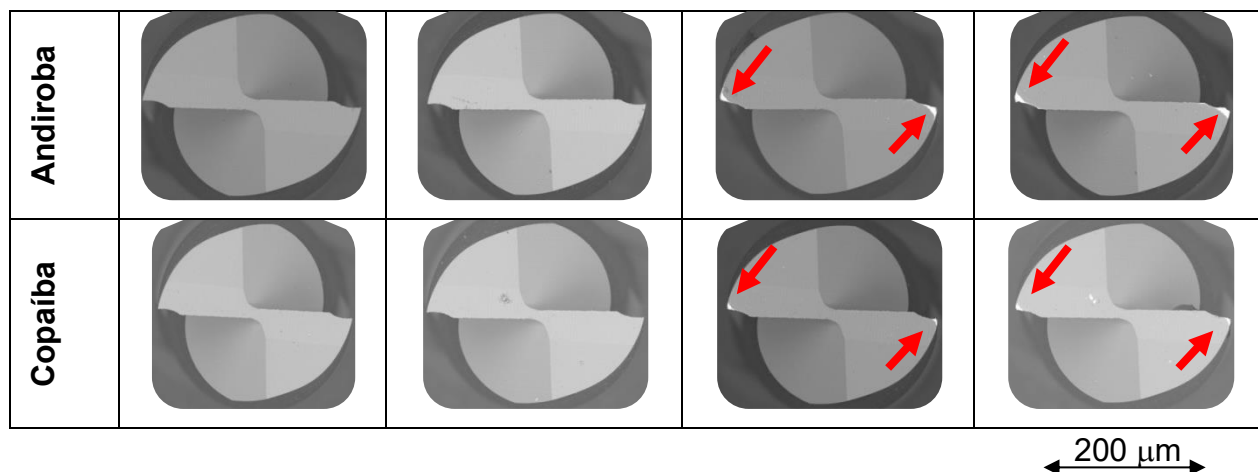


FIGURA 5.21. Imagens de topo novas e usinadas após 100 mm de comprimento usinado de teste e réplica com os Fluidos de Corte (FC): Fluido 1, Fluido 2, Andiroba e Copaíba.

Na Figura 5.22, são apresentados os resultados do desgaste em relação ao percentual de redução do diâmetro, juntamente com os valores absolutos para cada condição de lubrificação. Observa-se que os óleos de andiroba e copaíba apresentaram valores médios de menores desgaste e a condição a seco novamente na maior taxa de desgaste. Os diminuição do diâmetro para óleo de andiroba, copaíba, Fluido 1 e Fluido 2, foram 67,12%, 64,10%, 31,68% e 23,15% inferiores à condição a seco, respectivamente. A redução absoluta média do diâmetro variou entre 4,2 e 13 μm , similar aos resultados aplicando os fluidos na direção contrária.

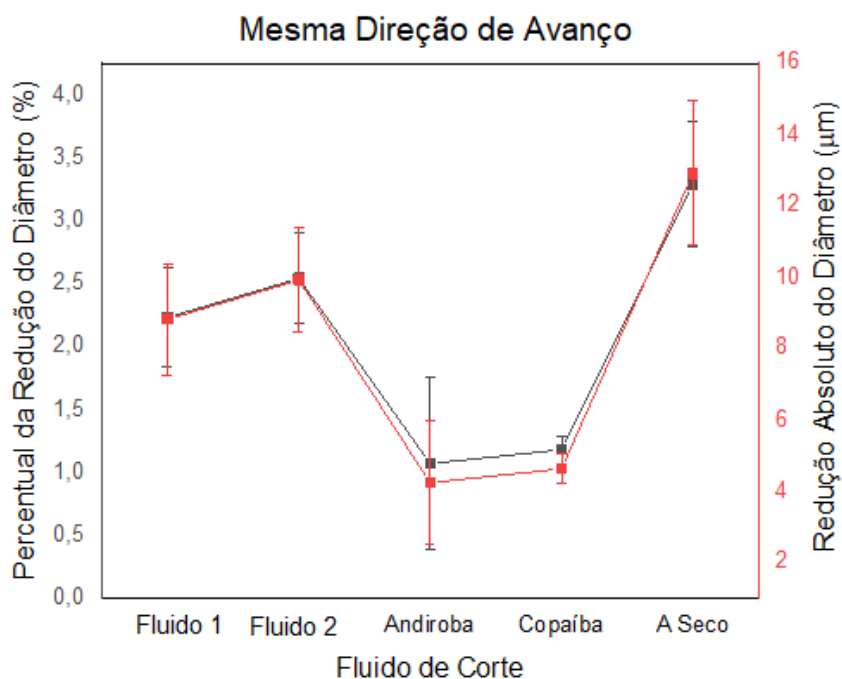
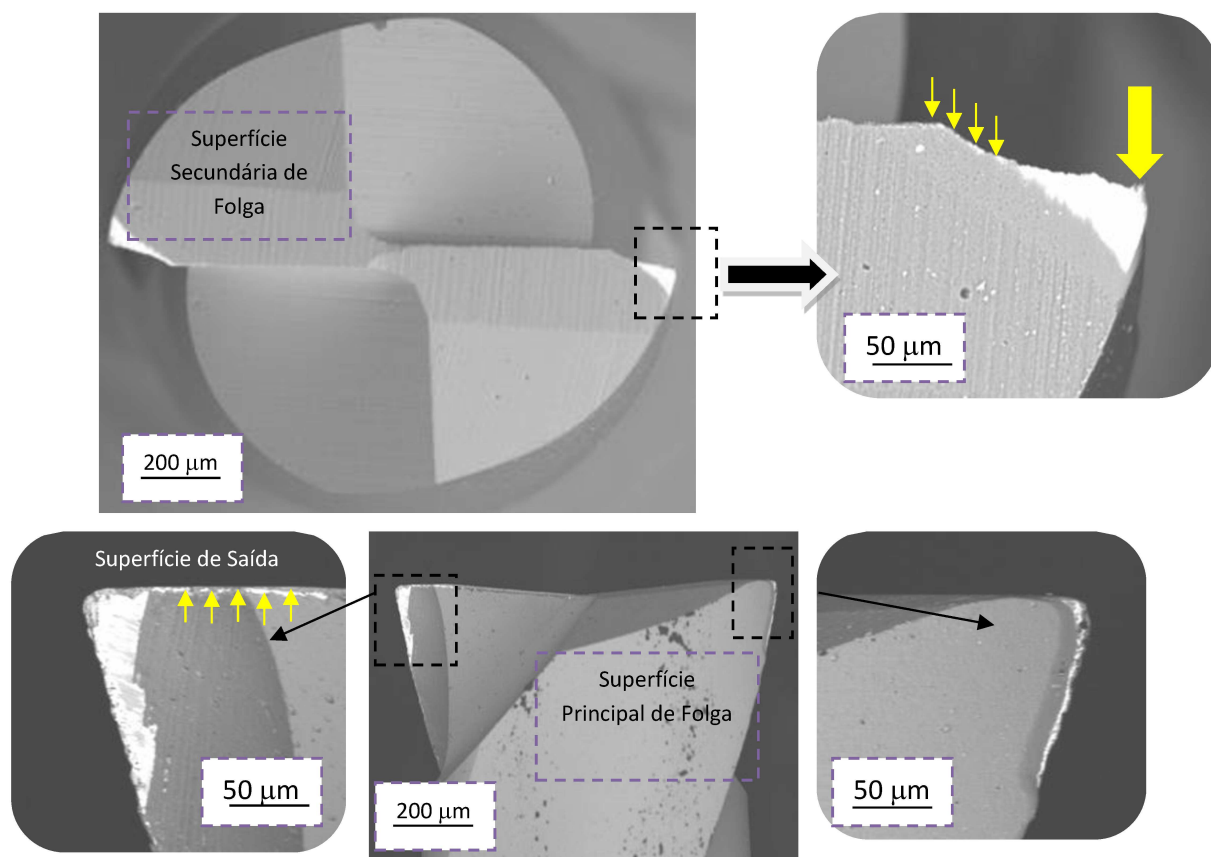


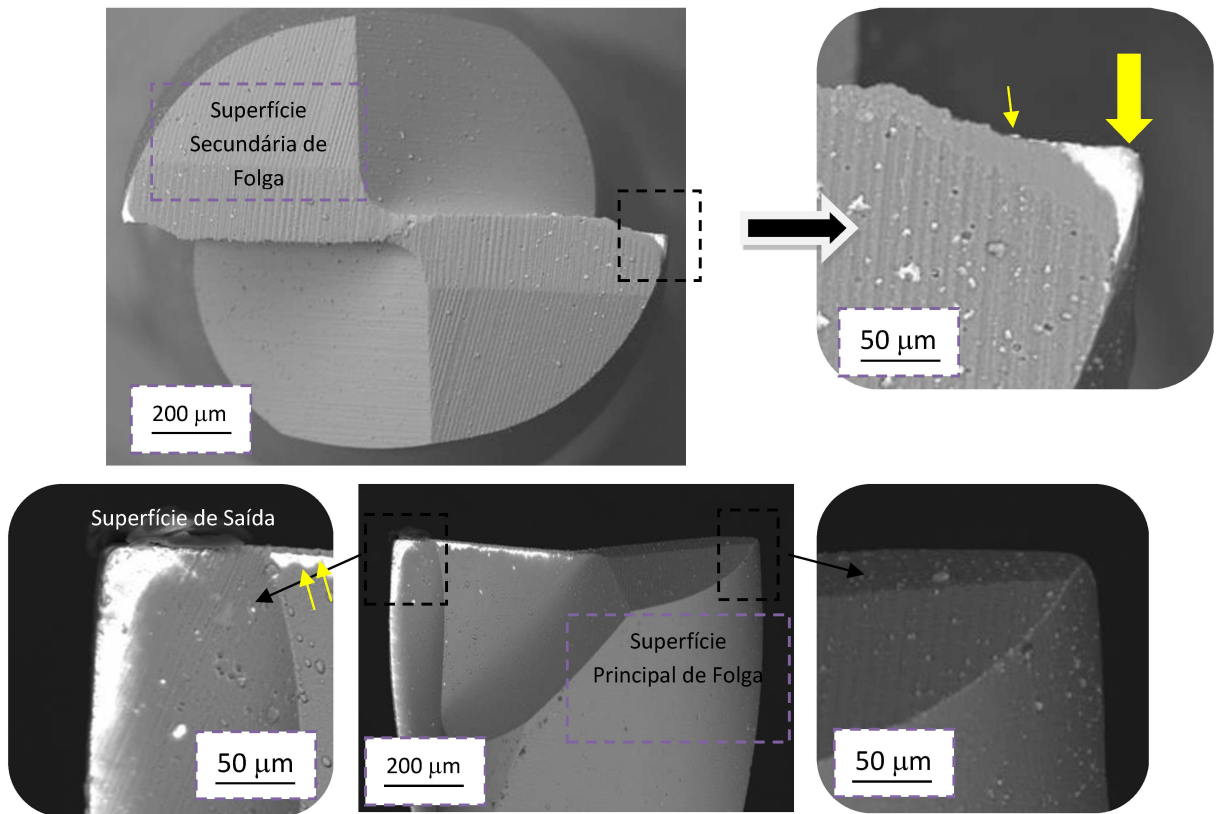
FIGURA 5.22: Resultado de desgaste médio e percentual de redução para as diferentes condições com o bocal na mesma direção de avanço.

A Figura 5.23 apresenta as imagens das ferramentas após a usinagem dos 100 mm. A forma de desgaste é similar à situação anterior. É possível identificar o arredondamento da ponta e o desprendimento do revestimento para todas as condições.

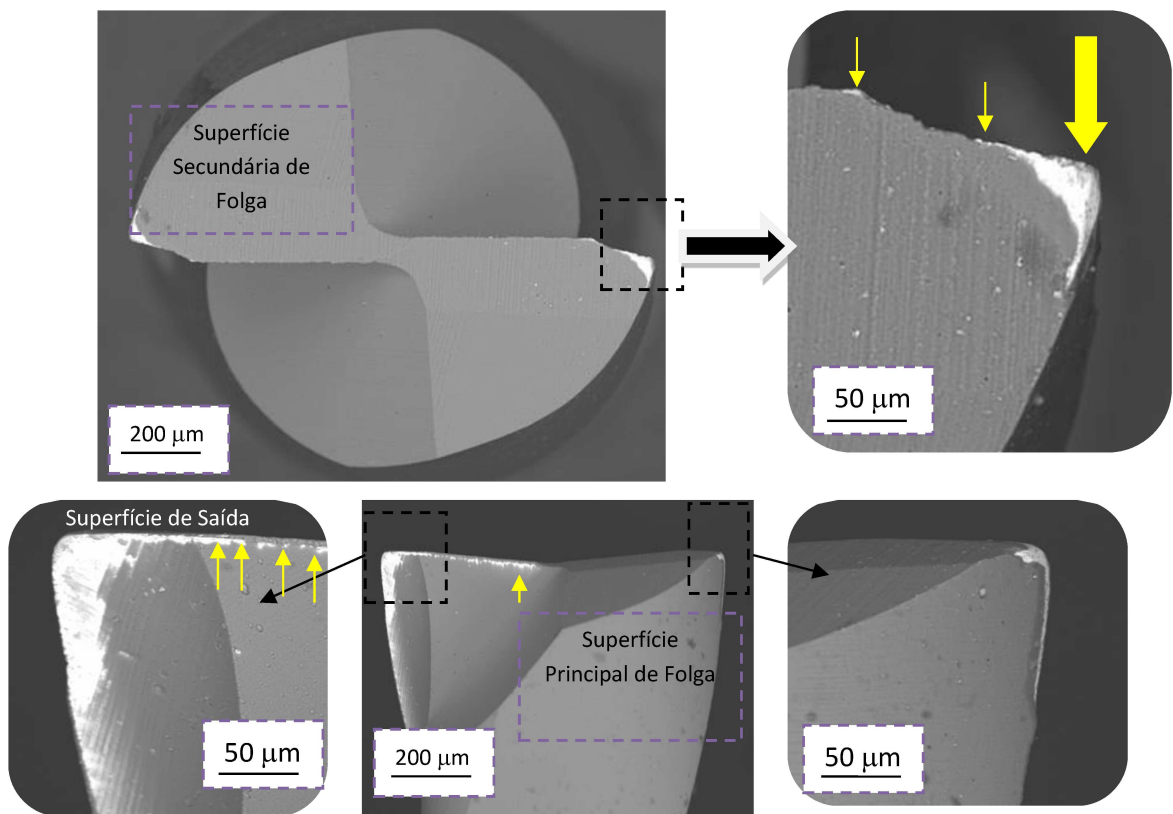
É possível observar o desgaste de flanco. Alonso (2023) microfresou este mesmo material o Aço H13, com variação de avanço ($1\text{ }\mu\text{m/dente}$, $5\text{ }\mu\text{m/dente}$ e $10\text{ }\mu\text{m/dente}$) e profundidade de corte ($10\text{ }\mu\text{m}$, $20\text{ }\mu\text{m}$ e $40\text{ }\mu\text{m}$) no microfresamento, utilizando o fluido de corte Vascomill, com a técnica MQL e observou o mesmo comportamento de sulcos paralelos à direção do fluxo de material e com marcas do processo de retificação.



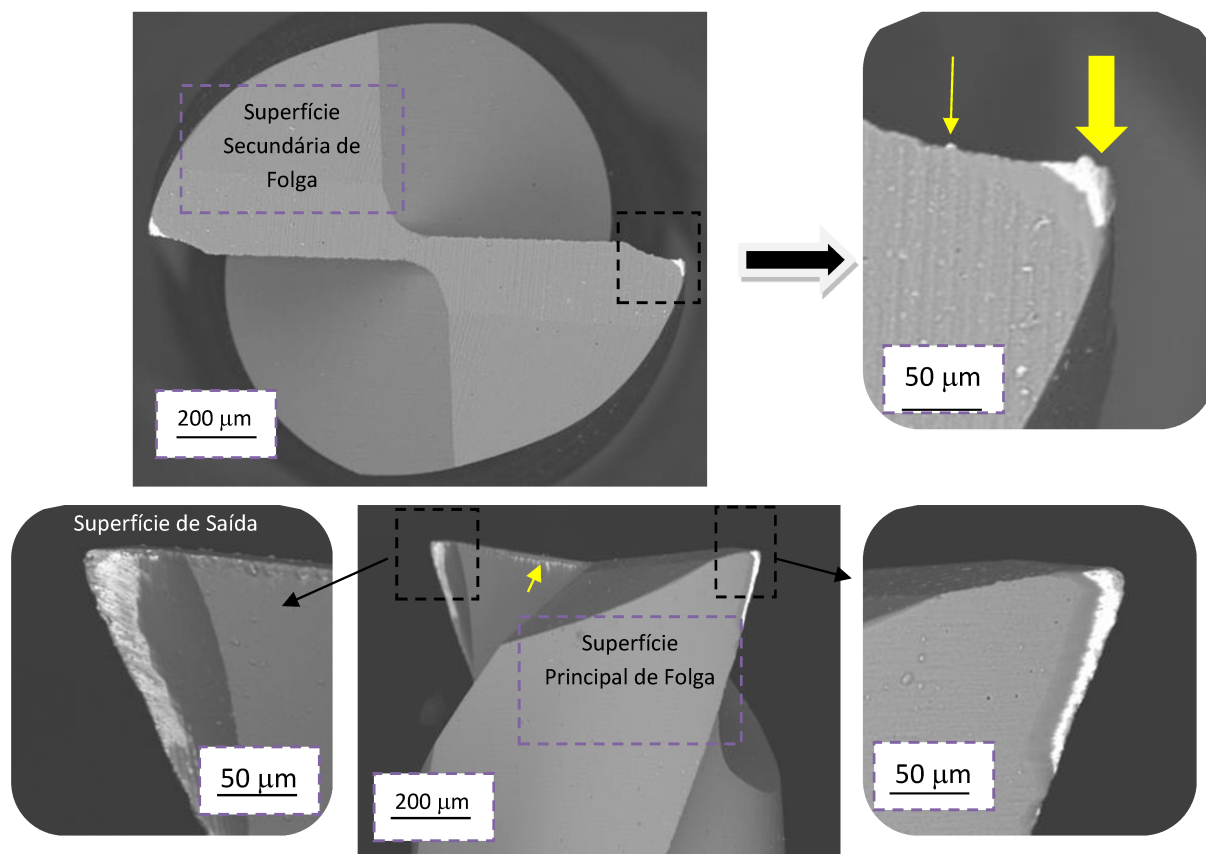
(a) Fluido 1



(b) Fluido 2



(c) Andiroba.



(d) Copaíba

FIGURA 5.23: Imagens obtidas pelo MEV da superfície secundária, primária de folga e superfície de saída após 100 mm de comprimento usinado com aplicação: Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c) e a Copaíba (d).

5.4 FORMAÇÃO DE REBARBAS

Nesta seção serão apresentados os resultados da quantidade de rebarbas formadas para cada condição. Para quantificar as rebarbas, foi realizada a medição da área da rebarba para cada um dos lados dos microcanais, concordantes e discordante. Foram realizadas medições em três posições distintas (início, meio e fim) por canal. O resultado apresentado é a média da área das rebarbas por comprimento usinado ($\mu\text{m}^2/\text{mm}$).

No fim deste tópico serão apresentadas as análises estatísticas sobre a influência dos fluidos de corte, comprimento usinado e direção de aplicação do fluido na formação das rebarbas. Por fim, serão identificados também os tipos de rebarbas formadas.

5.4.1 Rebarbas formadas quando o fluido de corte é aplicado na direção contrária à direção de Avanço

O gráfico da Fig.5.24 apresenta a quantificação das rebarbas para todos as condições após a usinagem de 100 mm, com os dados separados pelos lados concordante e discordante.

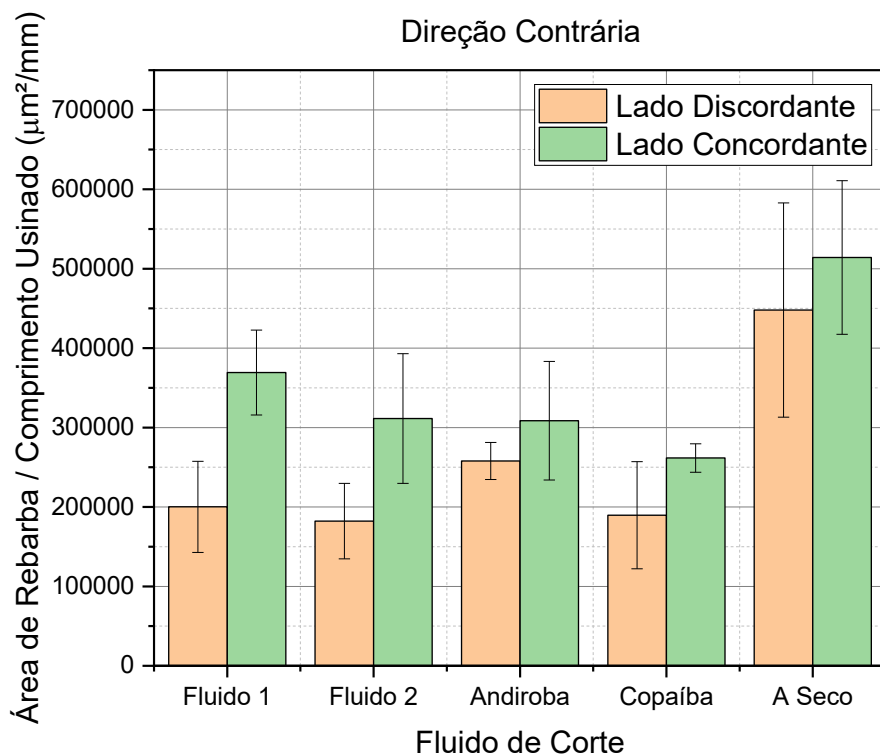


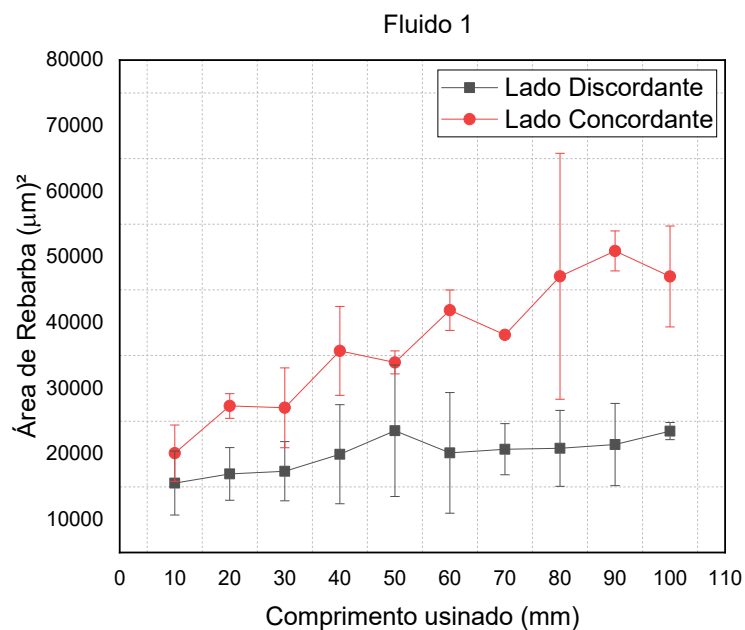
FIGURA 5.24. Quantidade de rebarbas de topo para os Fluidos de Corte: Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c), Copaíba e A Seco (e).

As rebarbas do lado discordante são menores do que o lado concordante, para todas as condições, inclusive condição a seco. De uma maneira geral o Fluido 1, Fluido 2 e copaíba apresentaram as menores rebarbas e valores estatisticamente similares. Para o lado concordante observa-se que as rebarbas formadas com a aplicação do óleo de copaíba, andiroba, Fluido 2 e Fluido 1 foram 49,09%, 39,98%, 39,44% e 28,17% inferiores à condição a seco, respectivamente. Para o lado discordante a ordem foi

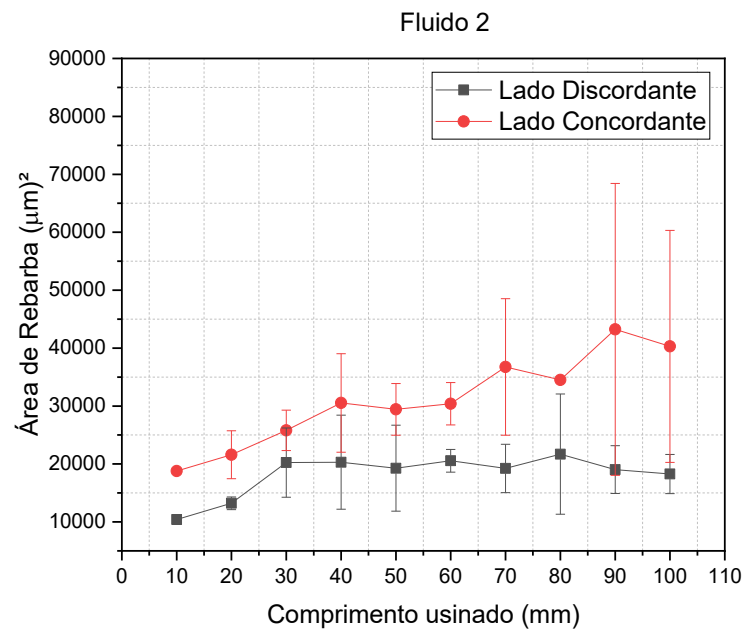
andiroba, Fluido 1, copaíba e Fluido 2, 42,42%, 55,31%, 57,68% e 59,31% inferiores à condição a seco respectivamente. Dessa forma, para o lado concordante foi o óleo da copaíba teve menor área de rebarba, para o lado discordante foi o Fluido 2.

Os gráficos da Fig.5.25 apresentam a evolução da área das rebarbas formadas com o comprimento usinado para cada fluido de corte: Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Óleo de Andiroba (c) e Óleo de Copaíba (d) e A Seco (e).

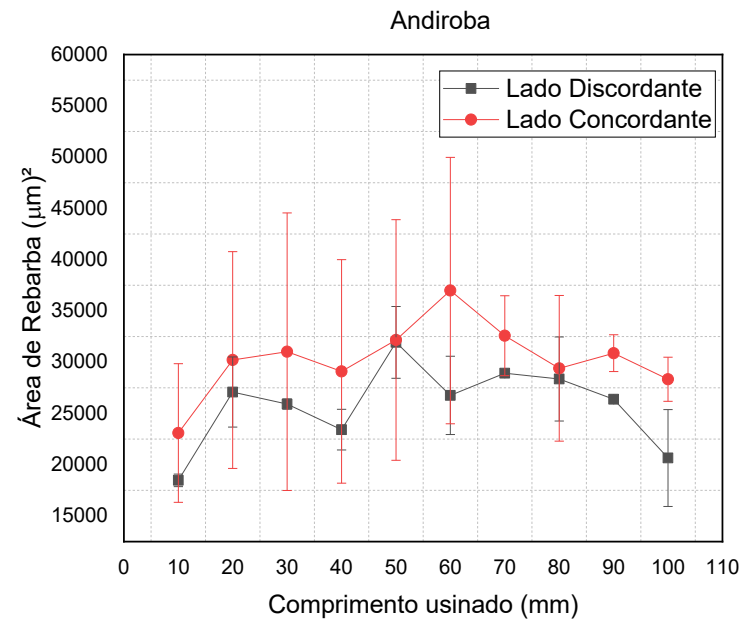
Em geral, a área das rebarbas aumentam com o comprimento usinado para os fluidos de corte Fluido 1, Fluido 2 e a Seco. Para o óleo da andiroba, após 60 mm usinados, a área de rebarba diminui. Para o óleo da copaíba, a área das rebarbas aumentam até 40 mm de comprimento usinado e depois se mantém aproximadamente constante até o comprimento final de 100 mm.



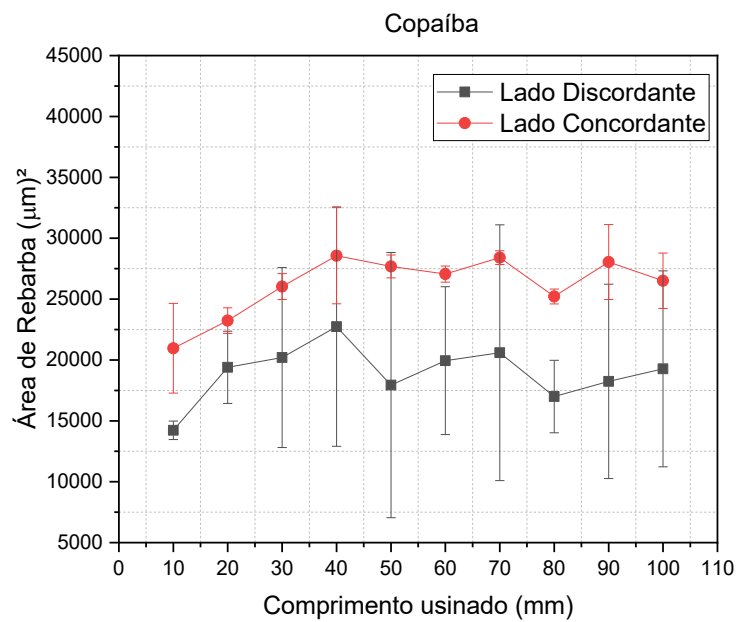
(a)



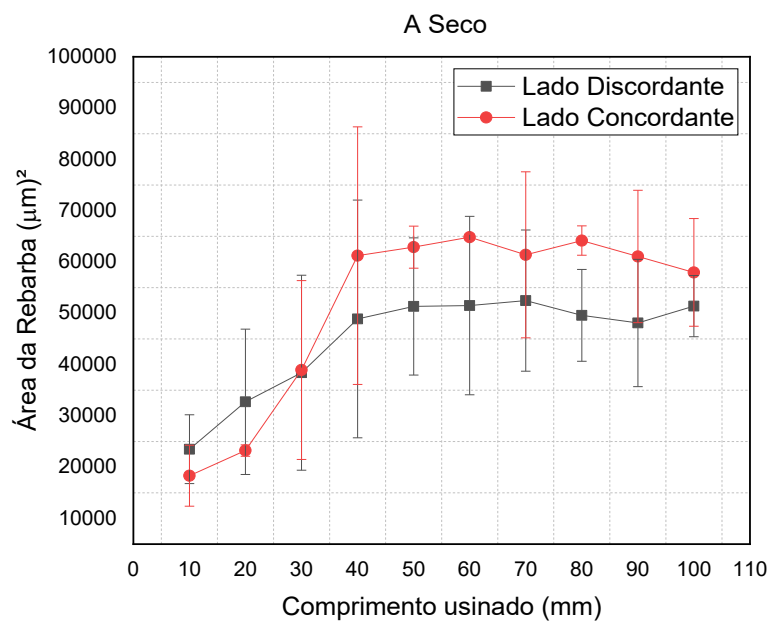
(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURA 5.25: Quantidade de rebarbas por comprimento usinado para os Fluidos de Corte: Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c), Copaíba e Seco (e).

O lado concordante para todos os fluidos de corte foi o que resultou em maiores rebarbas. A Figura 5.26 mostra a evolução da área da rebarba com o comprimento usinado para todos os fluidos de corte. Considerando a situação após usinagem de

100 mm, A menor área de rebarba foi obtida quando se utilizou o óleo da copaíba, seguido do óleo de copaíba. Os Fluidos 1 e 2 tiveram resultados intermediários entre estes óleos e a condição a seco, situação que gerou as maiores áreas. Segundo Lee e Dornfeld (2002) essa diferença se deve à quantidade de material que é empurrada na frente da aresta de corte e na direção da força de corte como resultado da rotação da ferramenta, que inicia a trajetória no lado discordante e finaliza no lado concordante. Dessa maneira, a orientação da força de corte e da tensão no material se distância do lado oposto e se dirige ao lado concordante. YUAN, et al. (2022), complementa que a rebarba no lado discordante é o produto da deformação da extrusão, e a rebarba no lado concordante é o produto da fratura incompleta dos cavacos.

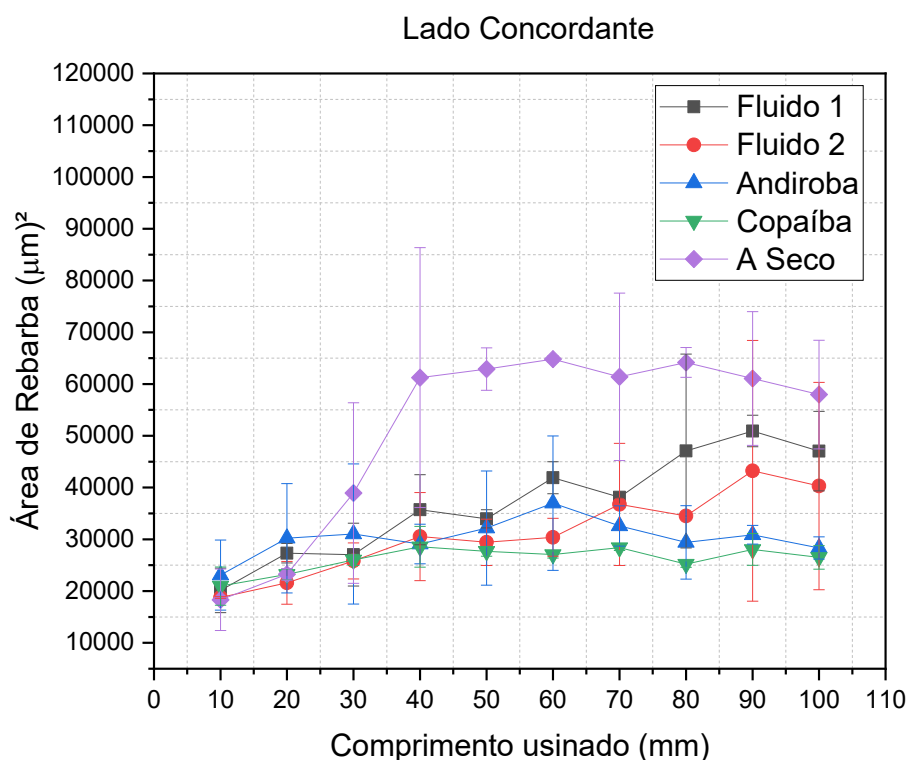
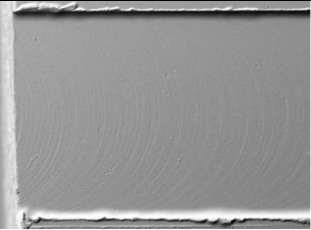
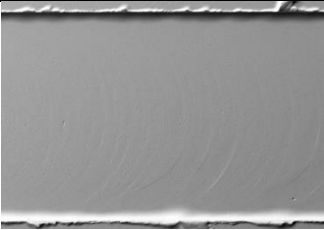
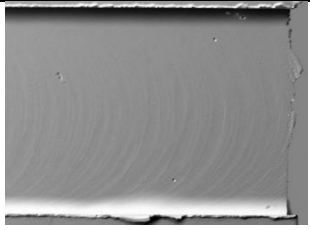
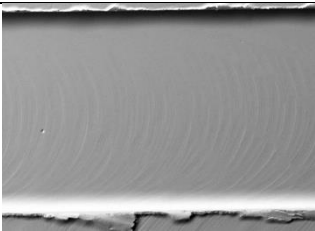
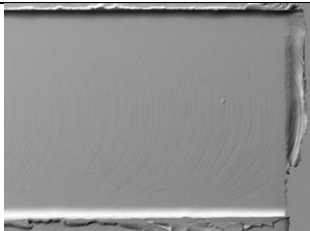


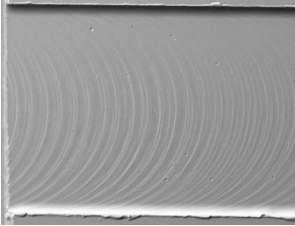
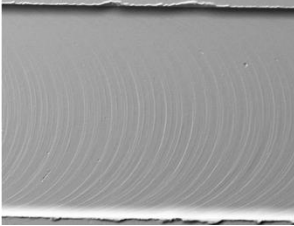
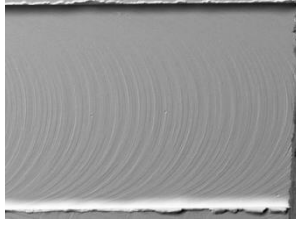
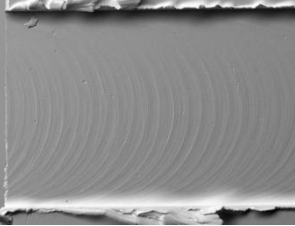
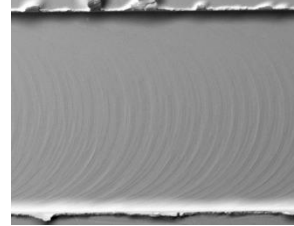
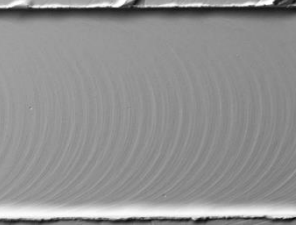
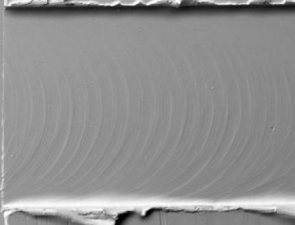
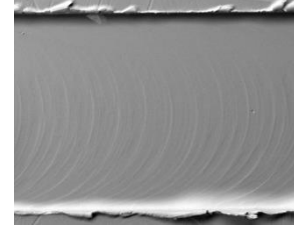
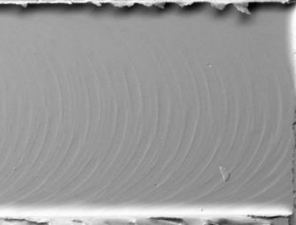
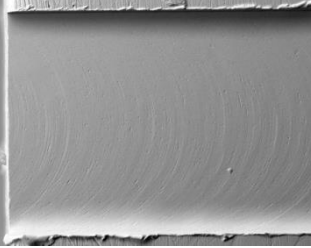
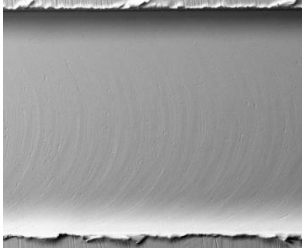
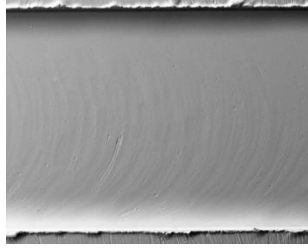
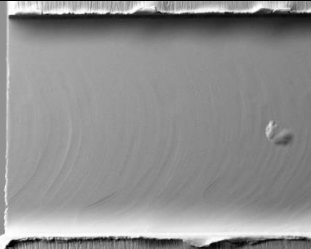
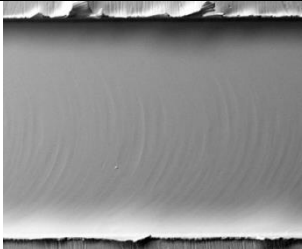
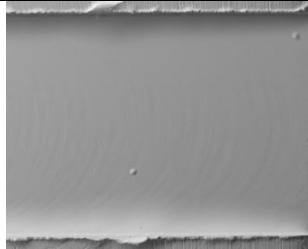
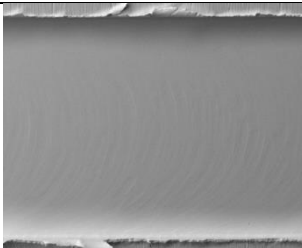
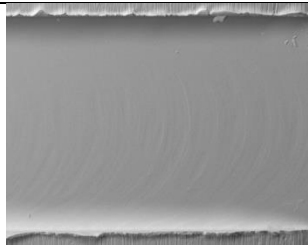
FIGURA 5.26. Quantidade de rebarbas por comprimento usinado para todos os Fluidos de Corte para o lado concordante.

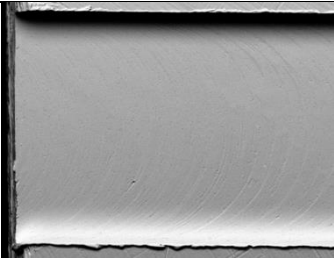
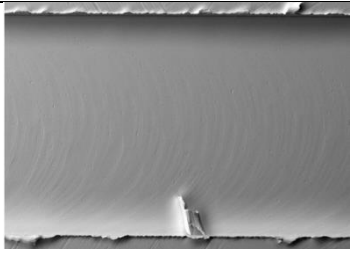
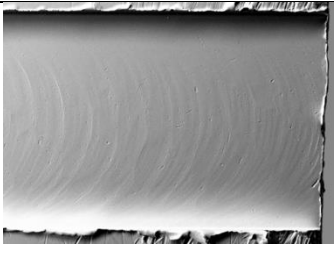
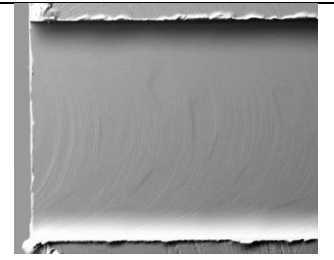
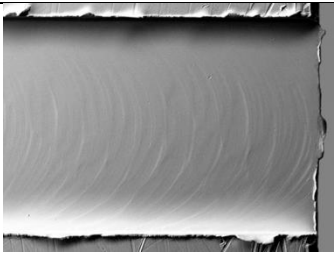
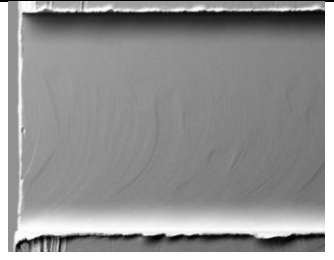
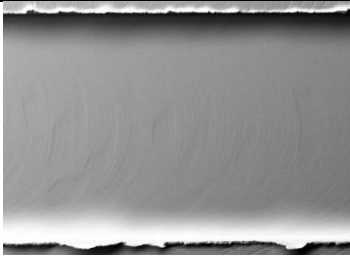
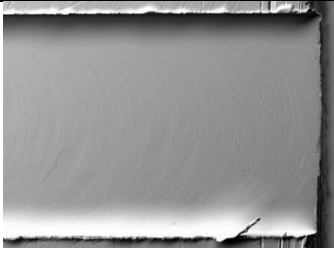
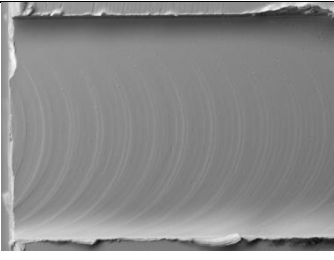
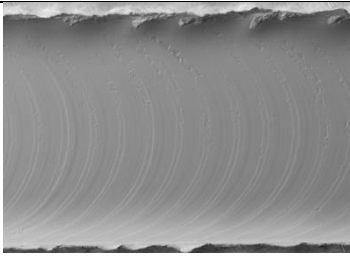
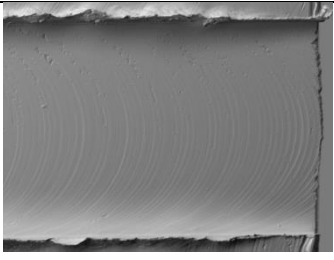
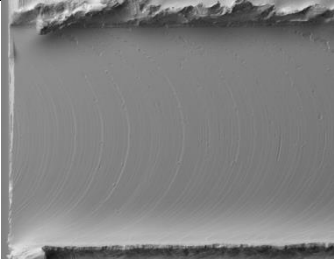
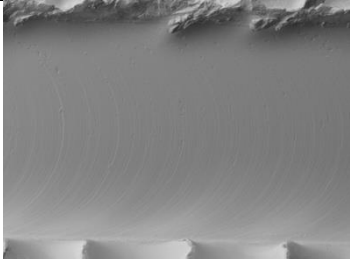
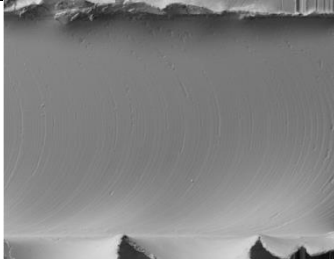
Observa-se que, independente da condição de lubrificação, a área das rebarbas tem tendência a aumentar com o comprimento usinado. Este foi o critério de fim de vida utilizado por Ziberov et al. (2016). A largura da rebarba cresce à medida que o comprimento usinado aumenta devido ao desgaste da ferramenta. Com o aumento

do raio de aresta da ferramenta, o mecanismo de “ploughing” aumenta (ASLANTAS et al.,2016). Além disso, vários tipos de rebarbas se formam no processo de microfresamento de topo. Alguns autores classificaram essas rebarbas em vários aspectos, como a localização das rebarbas, formatos das rebarbas e mecanismo de formação (GILLESPIE & BLOTTER, 1976; NAKAYAMA & ARAI, 1987; CHERN, 2006).

O aumento da rebarba em relação ao comprimento usinado pode ser observado por meio das imagens dos canais gerados pelo MEV. A Figura 5.27 mostra imagens dos canais para todos os fluidos de corte, para o início do corte, após 50 mm usinados e ao final dos 100 mm de comprimento usinado. É possível perceber o aumento significativo da rebarba no lado concordante.

FC		Início	Meio	Fim
Fluido 1	Canal 1 (10 mm)			
				
	Canal 5 (50 mm)			
				
	Canal 10 (100 mm)			
				
F	-	Canal 1 (10 mm)		

			
	Canal 5 (50 mm)		
			
	Canal 10 (100 mm)		
			
Andiroba	Canal 1 (10 mm)		
			
	Canal 5 (50 mm)		
			
	Canal 10 (100 mm)		
			

Copaíba	Canal 1 (10 mm)		
			
	Canal 5 (50 mm)		
			
	Canal 10 (100 mm)		
			
A Seco	Canal 1 (10 mm)		
			
	Canal 5 (50 mm)		
			
Canal 10 (100 mm)			

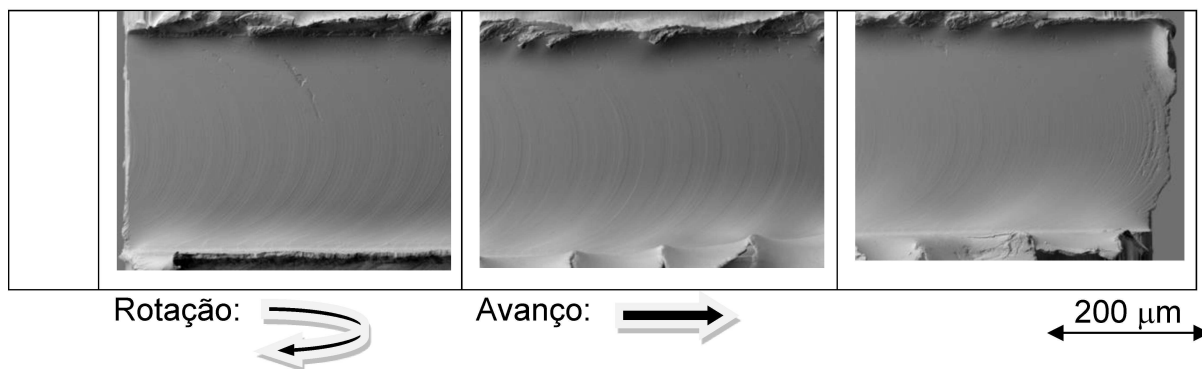
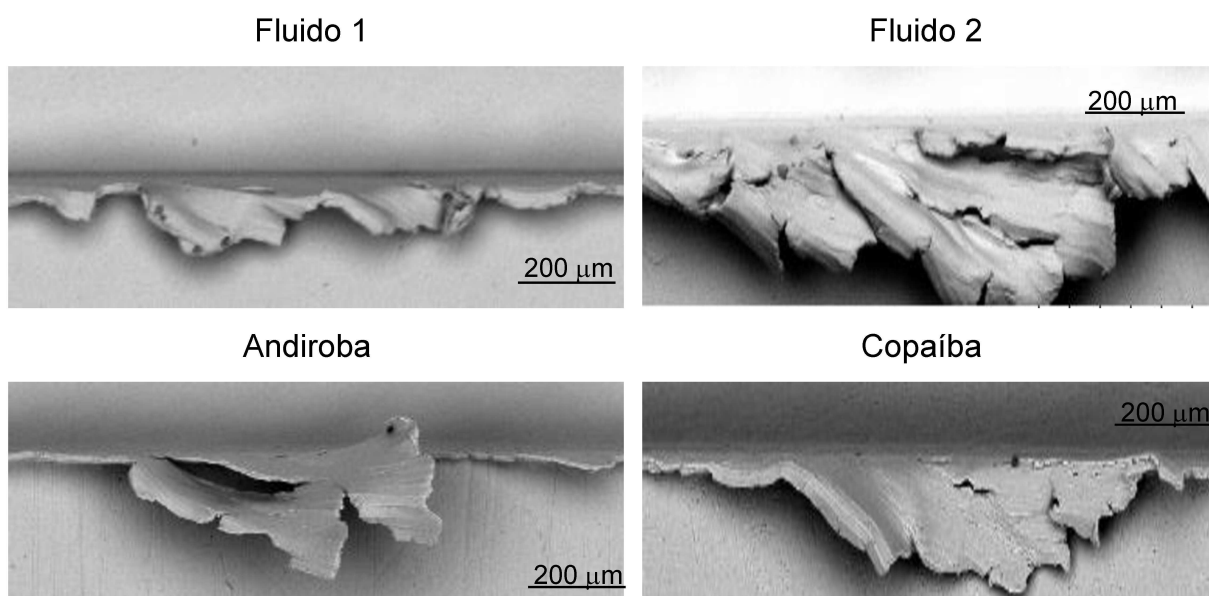


FIGURA 5.27: Rebarbas nos canais após ensaios realizados com diferentes fluidos de corte.

Foram selecionadas os tipos de rebarbas mais freqüentemente, para todos os fluidos de corte. A Fig. 5.28 ilustra as rebarbas de topo do tipo primária segundo Chern et al. (2007). Esse tipo de rebarba surge quando a ferramenta não gera cavacos, e o atrito assume um papel predominante, comprimindo e deformando o material à frente da ferramenta. Isso resulta na fratura próxima ao centro, originando rebarbas com uma largura aproximada da metade do diâmetro da ferramenta. No microfresamento com os óleos vegetais de Andiroba e Copaíba, também foram identificadas rebarbas do tipo pena, que são semelhantes ao tipo agulha, que se forma quando ocorre fratura da rebarba primária durante o processo de usinagem.



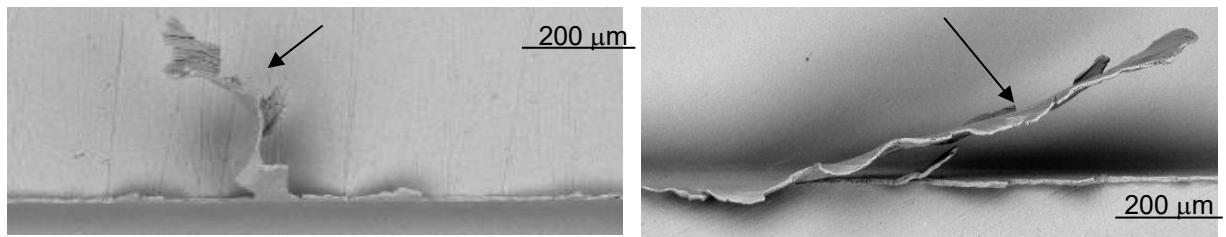


FIGURA 5.28: Rebarbas do tipo primária nos canais após ensaios realizados com diferentes fluidos de corte, a seta preta indica a rebarba em forma de pena.

Na Fig 5.29 é apresentada uma forma típica da rebarba na usinagem na condição a seco. Nas rebarbas, pode-se perceber uma quantidade significativa, devido a passagens da aresta de corte da ferramenta, sendo assim, a espessura de corte não foi suficiente para formar o cavaco.

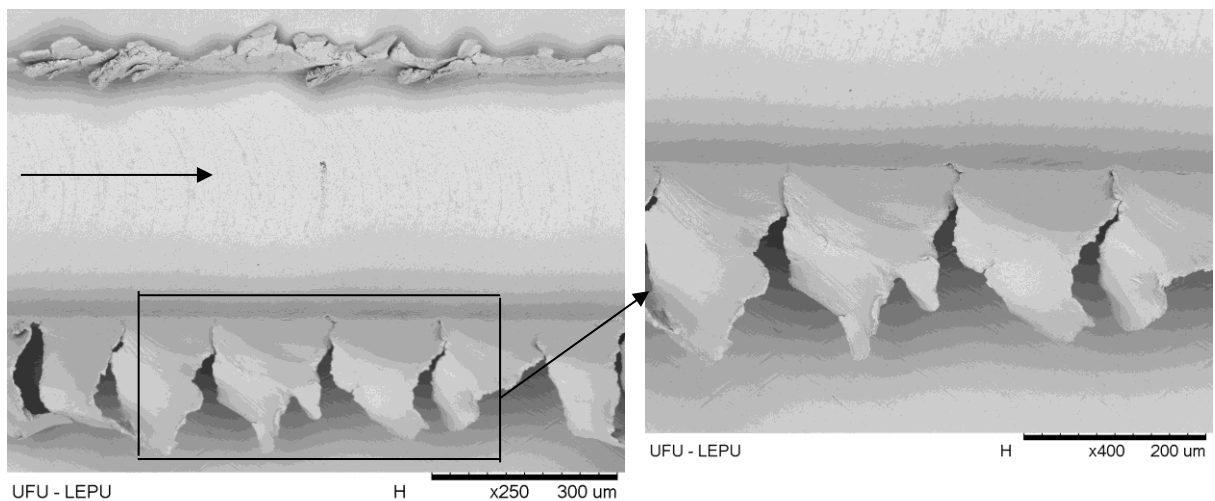


FIGURA 5.29: Rebarbas formadas na microusinagem A Seco do aço H13.

5.4.2 Rebarbas formadas quando o fluido de corte é aplicado na mesma direção de Avanço

Os resultados para área de rebarba com o fluido aplicado na mesma direção do avanço são apresentados na Fig.5.30.

Os resultados são similares da situação de aplicação do fluido na direção contrária ao avanço, apenas com um desvio padrão menor. As rebarbas do lado concordante são maiores e a condição seco gerou as maiores rebarbas para ambos os lados. O óleo de copaíba se destaca por ter gerado as menores rebarbas.

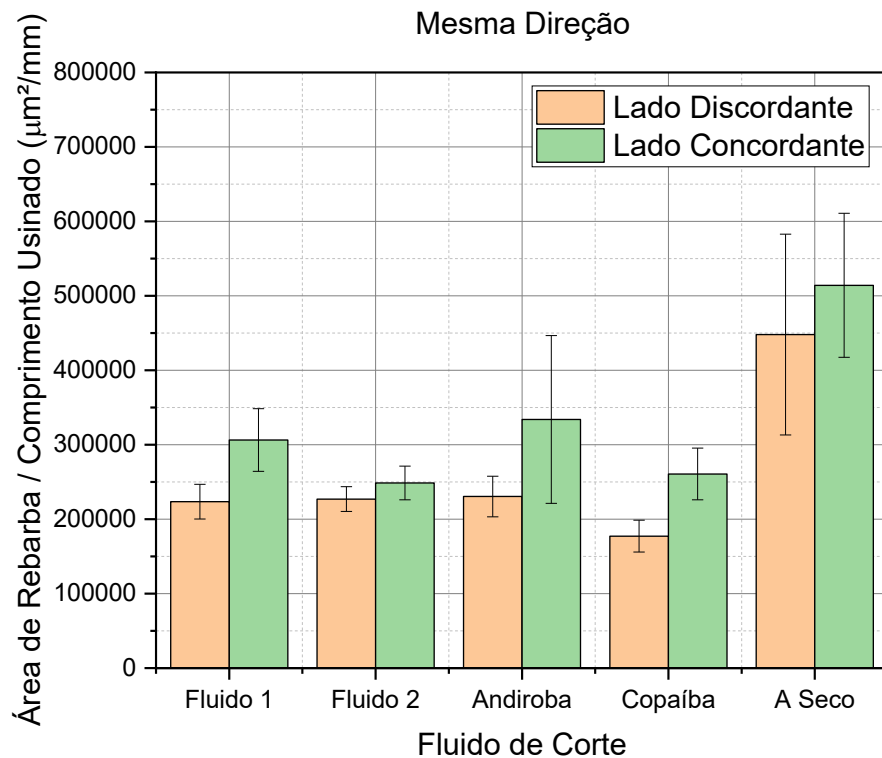
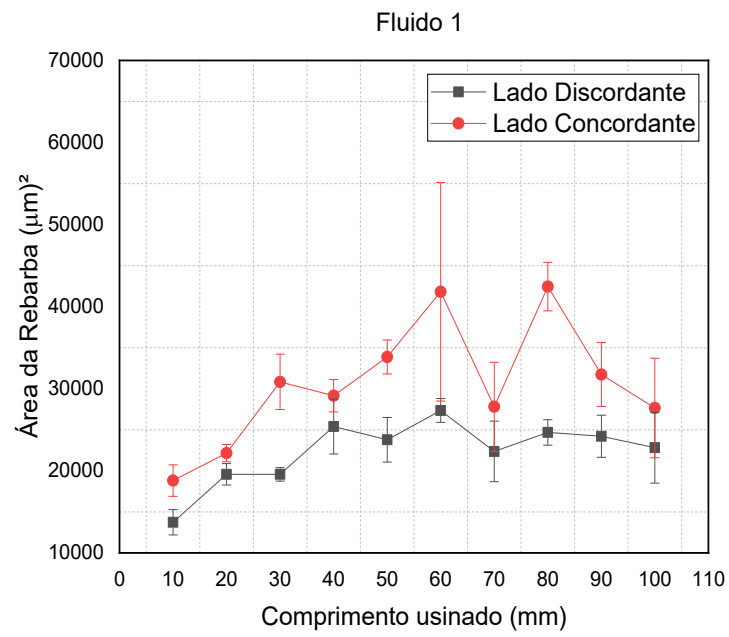
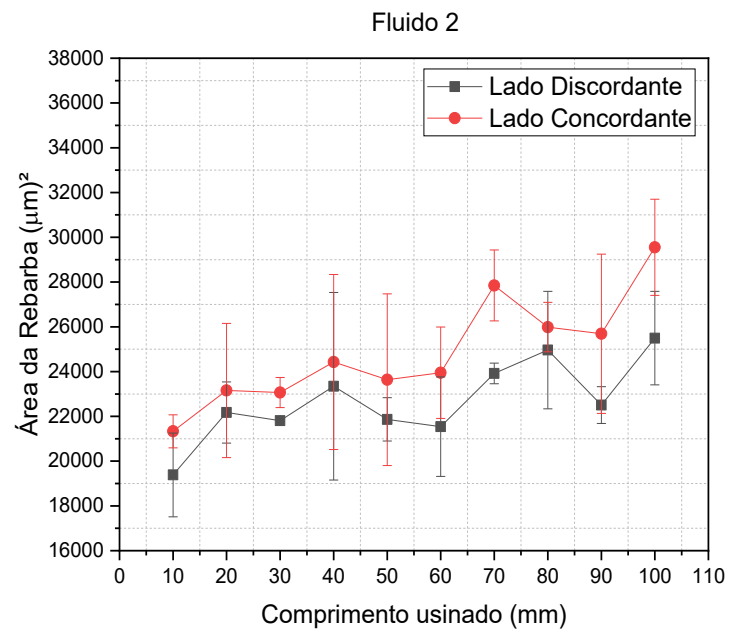


FIGURA 5.30: Quantidade de rebarbas de topo para os Fluidos de Corte

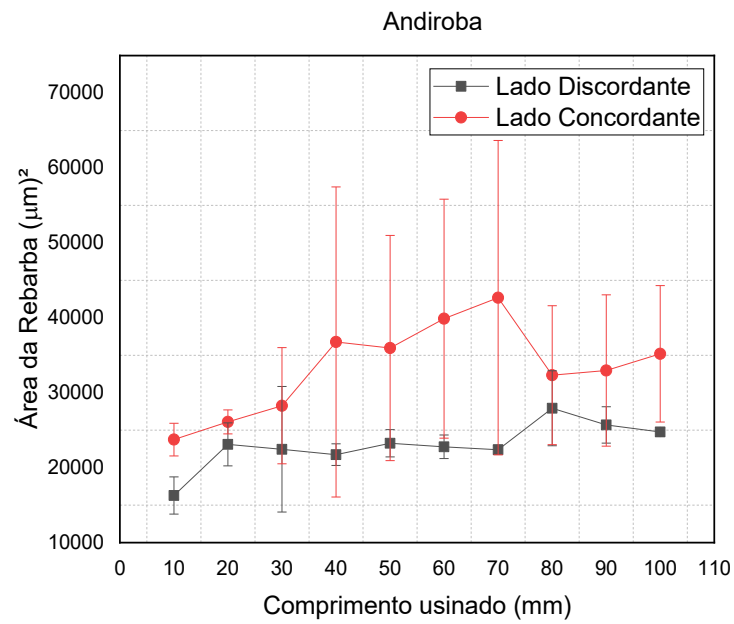
A Fig.5.31 mostra a evolução da área da rebarba com o comprimento usinado. Observa-se uma tendência de aumento na rebarba, e isso se deve ao desgaste da ferramenta. Em alguns casos ocorre uma considerada variação ao longo do comprimento usinado. Vários fatores podem influenciar a formação de rebarbas além do desgaste da ferramenta, como por exemplo o batimento radial, que pode ser provocado devido a desgaste diferente entre as duas arestas da ferramenta, variação nas propriedades do material entre outros (Wang et al.,2019).



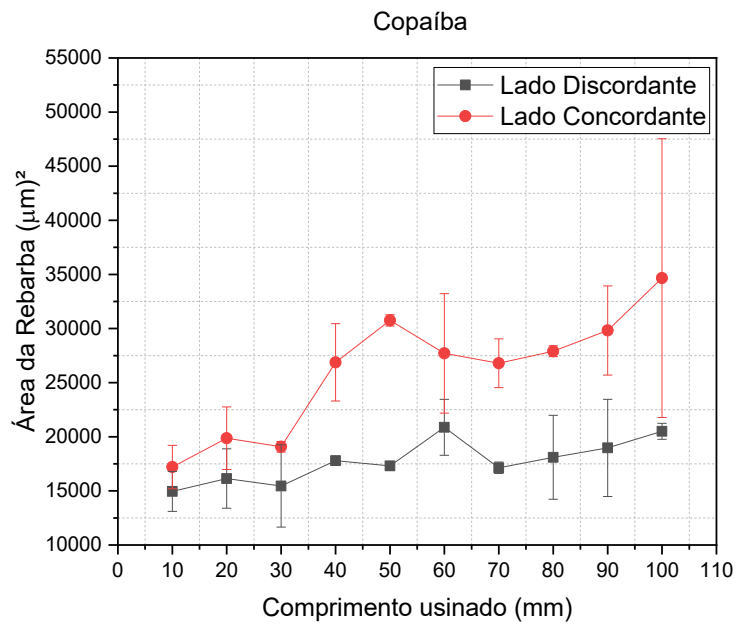
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 5.31: Quantidade de rebarbas por comprimento usinado para os Fluidos de Corte: Fluido 1 (a), Fluido 2 (b), Andiroba (c) e Copaíba (d).

Para uma melhor comparação entre todas as condições, a Figura 5.32 apresenta a evolução da área da rebarba para todos os fluidos de corte para o lado concordante. Os melhores resultados de quantidade de rebarbas, inicialmente até 30 mm foram com o Óleo de Copaíba, a partir daí o Fluido 2 gerou menores quantidades de rebarbas e a condição A Seco se destacou ainda mais.

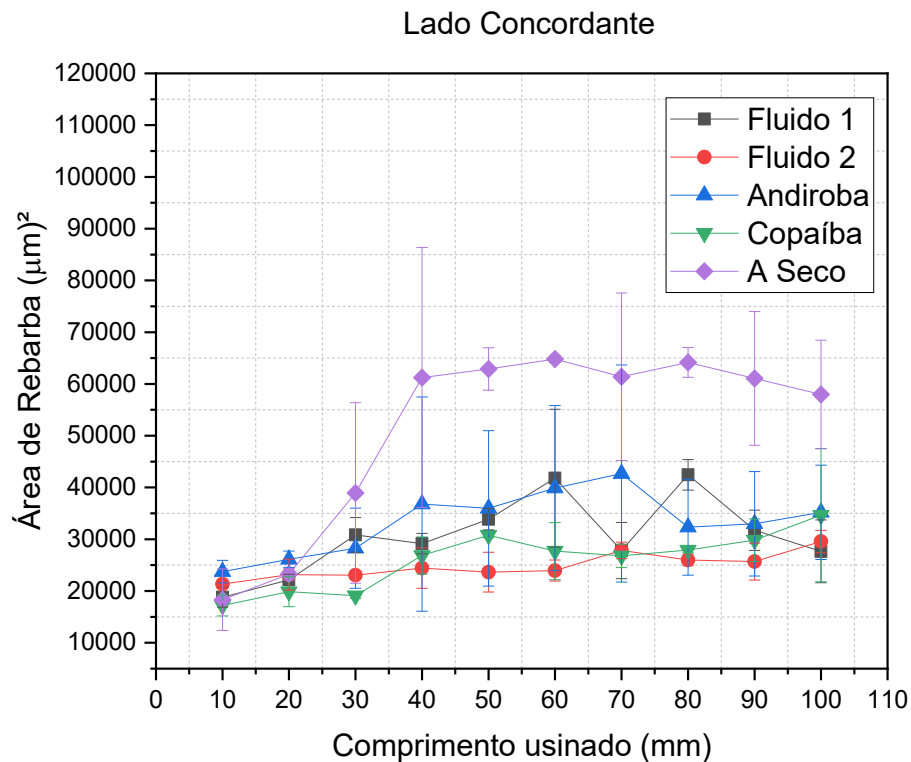
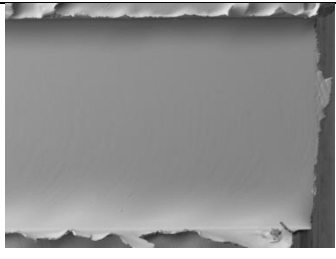
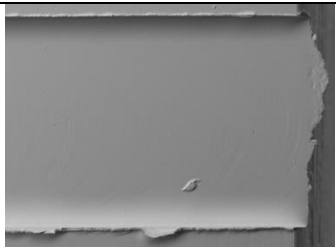
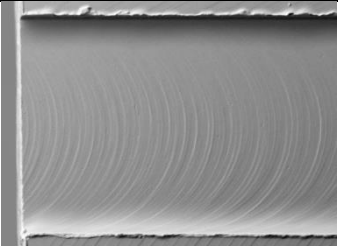
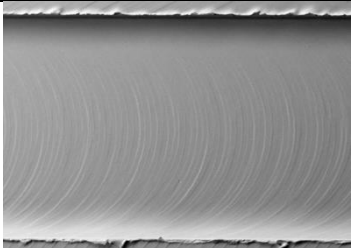
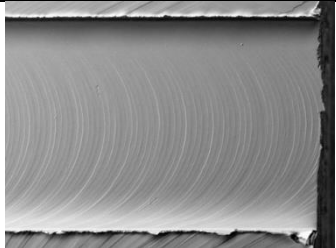
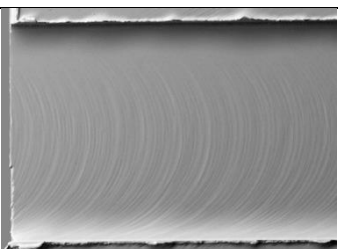
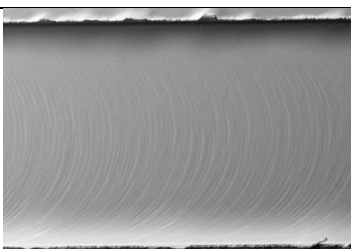
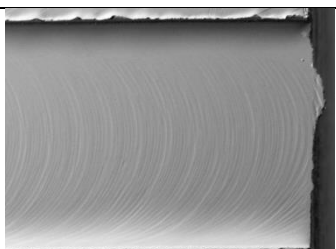
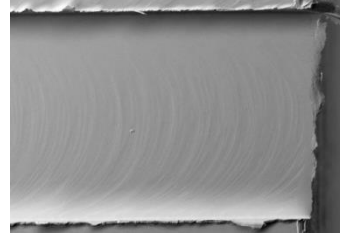
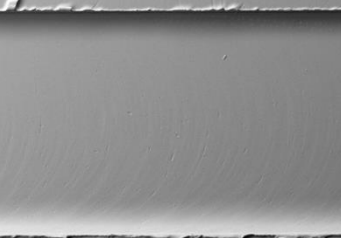
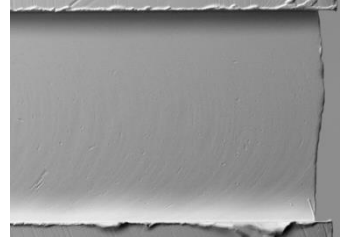
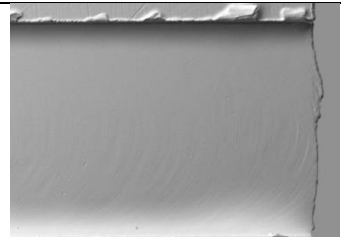
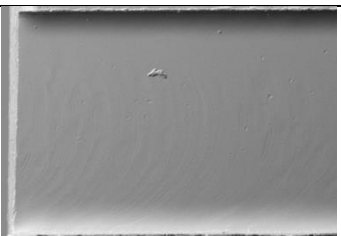
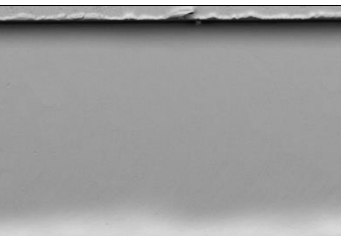
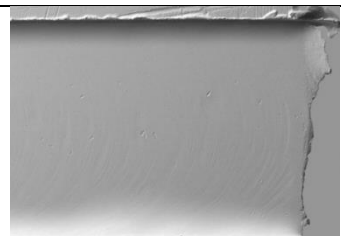
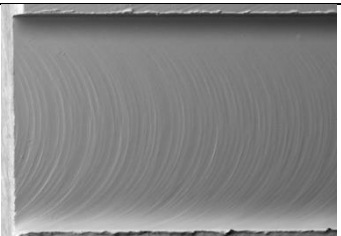
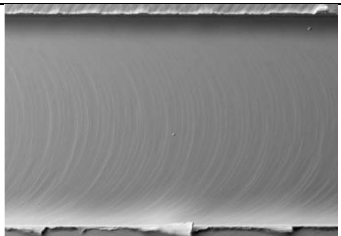
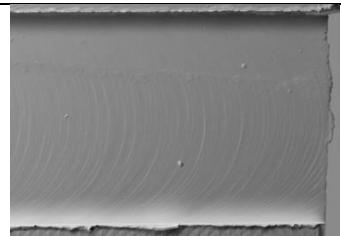
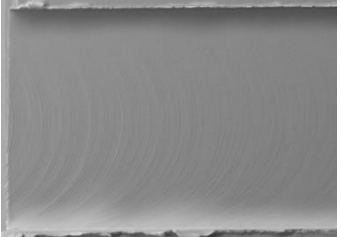
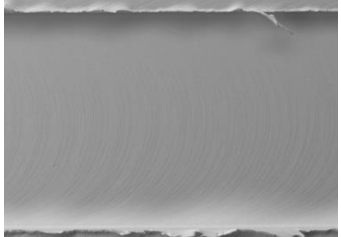
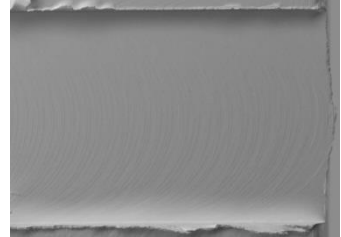


FIGURA 5.32: Quantidade de rebarbas por comprimento usinado para todos os Fluidos de Corte para o lado concordante.

A Figura 5.33 mostra imagens dos microcanais no início da usinagem, meio e ao final dos 100 mm de corte. Novamente observa-se um aumento significativo da rebarba no lado concordante. É possível notar que as rebarbas foram predominantemente do tipo rebarbas menores, principalmente no lado discordante. Pesquisas com condições similares com o Aço H13 de Queiroz (2022) e Alonso (2023) também obtiveram o mesmo padrão de rebarbas.

FC		Início	Meio	Fim
Fluido 1	Canal 1 (10 mm)			
				
	Canal 5 (50 mm)			
				
	Canal 10 (100 mm)			
				
Fluido 2	Canal 1 (10 mm)			
				
	Canal 5 (50 mm)			
				
	Canal 10 (100 mm)			

			
Andiroba	Canal 1 (10 mm)		
			
	Canal 5 (50 mm)		
			
	Canal 10 (100 mm)		
			
Copaíba	Canal 1 (10 mm)		
			
	Canal 5 (50 mm)		
			

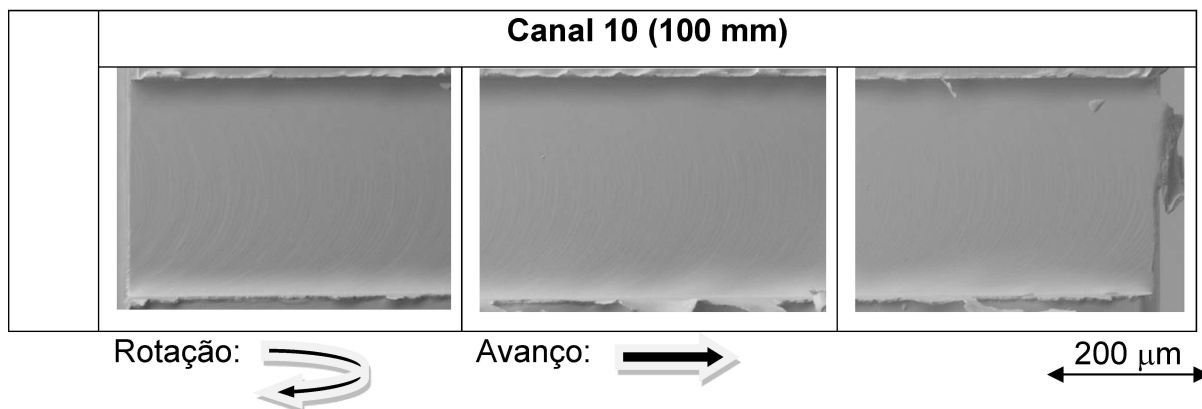
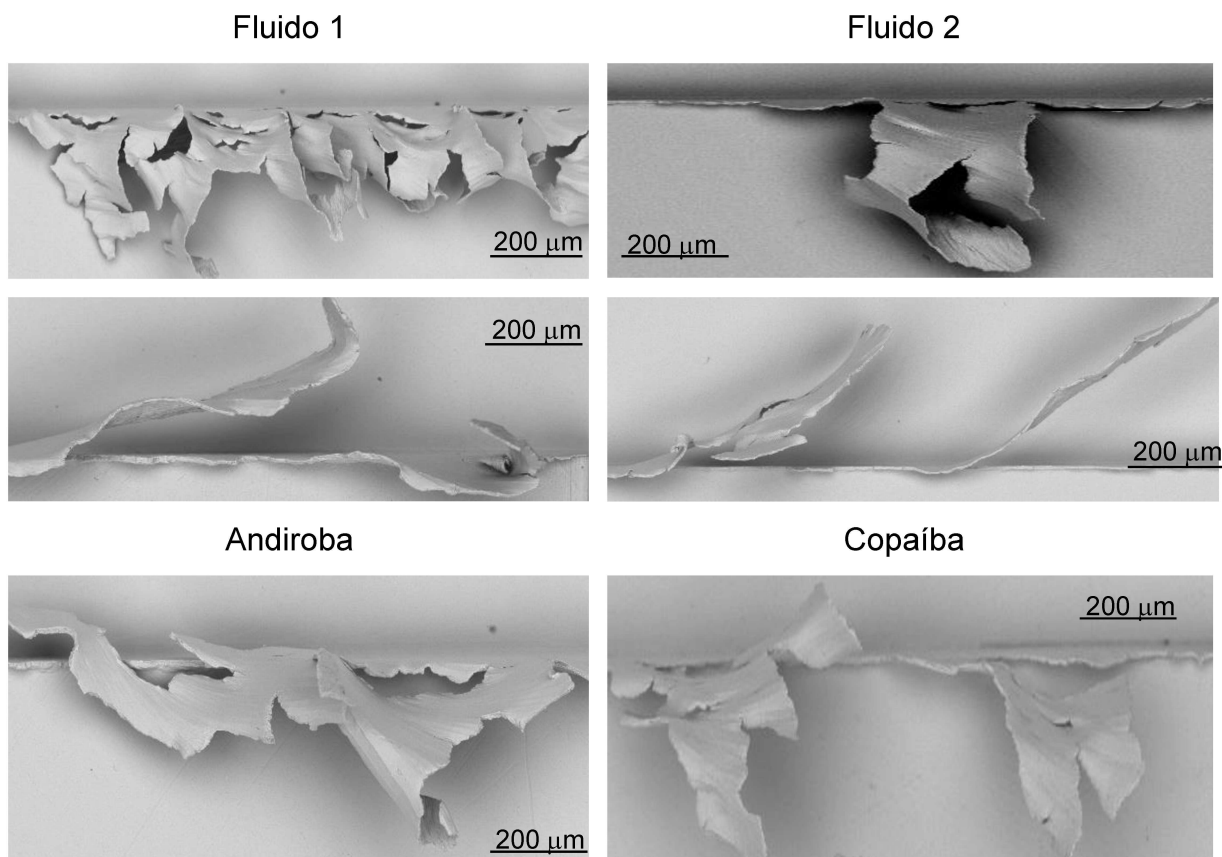


FIGURA 5.33: Rebarbas nos canais após ensaios realizados com diferentes fluidos de corte.

A Fig. 5.34 ilustra algumas rebarbas de topo geradas. Observa-se rebarbas do tipo pena e agulha. O Fluido 2 gerou em sua grande maioria, rebarbas primárias. Nos óleos vegetais de andiroba e copaíba foi gerada tanto rebarbas tipo pena como agulha.



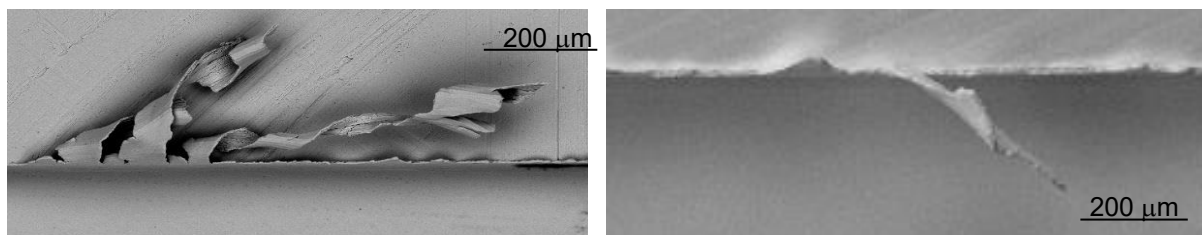


FIGURA 5.34: Rebarbas do tipo primária e pena encontradas nos canais após ensaios realizados com diferentes fluidos de corte.

Assim como foi feito para a rugosidade, foi feita também uma análise de variância (ANOVA), com o intuito de confirmar o efeito dos fluidos de corte na rebarbas. Como o lado concordante gerou as maiores áreas de rebarbas, foi escolhido para a análise estatística.

A análise de variância (ANOVA) foi feita com três fatores (fluido de corte, direção do bocal e comprimento usinado), sendo quatro níveis para o fluido de corte, dois níveis para direção do bocal e dez níveis para o comprimento usinado. O resultado de R^2 para o modelo obtido foi de 53,84%. A tabela 5.4 apresenta os resultados da análise estatística. O intervalo de confiança adotado foi de 95%, qualquer resultado de p-valor abaixo de 5% indicará que o fator avaliado ou a interação entre eles é significativo. Nessa análise o fluido de corte e a direção de aplicação foram significativos, assim como as combinações entre o fluido de corte e direção de aplicação, fluido de corte e comprimento usinado e finalmente, a interação entre todos os três fatores: fluido de corte, direção de aplicação e comprimento usinado.

Tabela 5.3: Resultados da ANOVA para as áreas de rebarba do lado concordante.

Fator	f-valor	p-valor
Fluido de Corte	13,231	1,15e-7
Direção do Bocal	6,628	0,01106
Comprimento Usinado	85,574	3,09e-16
Fluido de Corte * Direção do Bocal	4,387	0,00551
Fluido de Corte * Comprimento Usinado	2,822	0,04109
Direção do Bocal * Comprimento Usinado	0,518	0,47278
Fluido de Corte * Direção do Bocal * Comprimento Usinado	5,196	0,00196

A Figura 5.35 ilustra a influência do fluido de corte e comprimento usinado para as duas direções de aplicação de fluido. Nota-se que a direção de aplicação do fluido tem pouco efeito para o óleo da andiroba e o óleo da copaíba. O Fluido 1 provoca um aumento linear da rebarba quando aplicado na direção contrária, enquanto quando

aplicado na mesma direção do avanço, após aproximadamente 50 mm de comprimento usinado, ocorre uma redução significativa na quantidade de rebarba gerada. Já o Fluido 2 provoca aumento contínuo da área das rebarbas com o comprimento usinado para ambas as direções de aplicação.

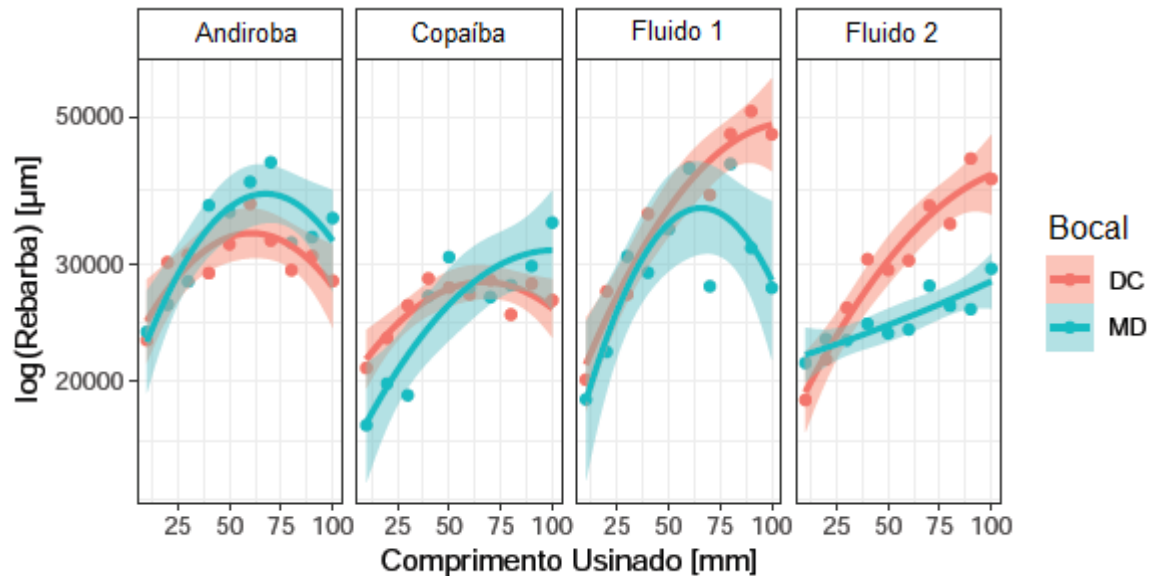


FIGURA 5.35: Influência estatística na formação da rebarba ao longo do comprimento usinado.

O efeito da direção de aplicação para todos os fluidos de corte pode ser melhor visualizado na Figura 5.36. Os resultados sugerem que a melhor condição em termos de área de rebarba, considerando um comprimento usinado de 100 mm é o Fluido 2 aplicado na mesma direção do avanço da ferramenta.

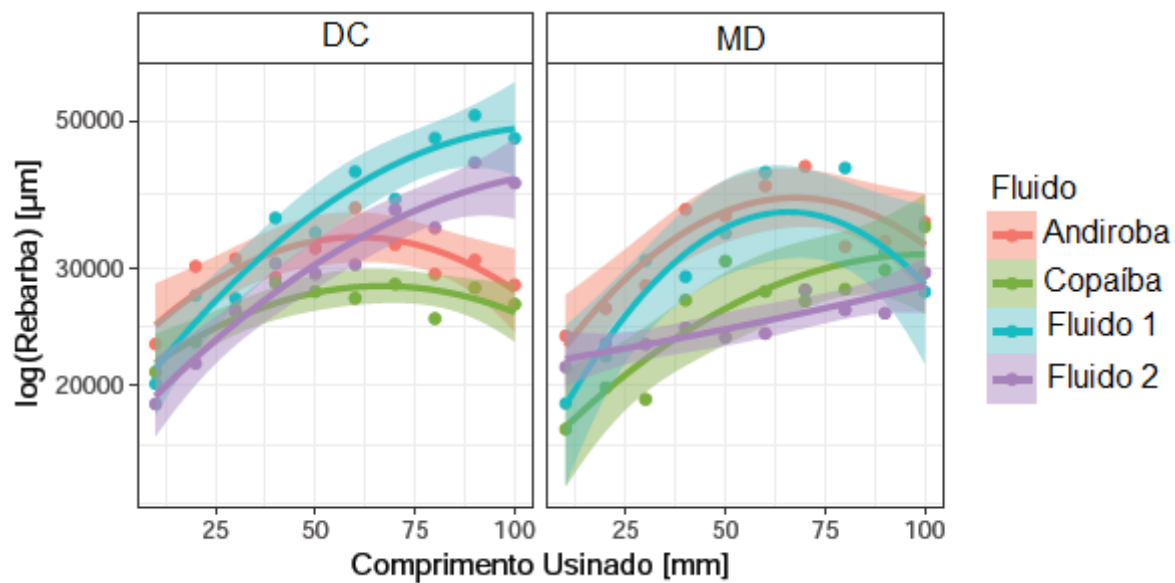


FIGURA 5.36: Influência estatística na formação da rebarba em relação à direção do bocal.

6.CONCLUSÕES

6.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS FLUIDOS DE CORTE

- Em relação à viscosidade dinâmica e cinemática, em ordem decrescente os resultados foram: óleo da Andiroba, Fluido 2, óleo da Copaíba e Fluido 1. Quanto à densidade, o óleo da Copaíba, óleo da Andiroba, Fluido 1 e Fluido 2, respectivamente foram os mais densos.
- Em relação à condutividade térmica, o Fluido 1 tem a maior condutividade, seguido do óleo da Andiroba, Fluido 2 e óleo da Copaíba.
- A molhabilidade dos fluidos de corte resultou com o Fluido 1 tendo maior ângulo de contato, seguido dos óleos da Andiroba e da Copaíba. O Fluido 2 obteve o menor ângulo.
- A maior energia específica no ensaio de esclerometria pendular foi obtida como Fluido 1, seguido da condição a seco, óleo da Copaíba, Fluido 2 e o óleo da Andiroba.

6.2 QUALIDADE SUPERFICIAL

- Através da análise realizada, fica evidente que os fluidos de corte desempenham um papel crucial na redução da rugosidade superficial durante o processo de microfresamento do aço Aço H13.
- A utilização dos fluidos de corte com os parâmetros de corte apresentados, independente da direção de aplicação, resulta em valores de rugosidade (Ra) entre 0,05 a 0,11 μm , menores do que a condição a seco, que resultou em rugosidades (Ra) entre 0,06 a 0,98 μm .
- Os óleos vegetais de andiroba e copaíba tem desempenho comparáveis e até superior em alguns casos aos fluidos comerciais, demonstrando eficácia para o processo, para o meio ambiente e saúde dos operadores.

6.3 DESGASTE DA MICROFERRAMENTA

- Com a aplicação do fluido na direção contrária ao avanço, o Fluido 1, Fluido 2, óleos de andiroba e copaíba reduziram o desgaste da ferramenta em 64,94%, 56,02%, 26,51% e 54,27% respectivamente, em relação à condição a seco.
- Aplicando o fluido na mesma direção do avanço, a redução do desgaste para os Fluido 1, Fluido 2, óleos de andiroba e copaíba foram, respectivamente, 31,68%, 23,15%, 67,12% e 64,10% inferiores à condição a seco.
- No que tange no mecanismo de desgaste o mais evidente foi o desgaste de flanco para todas as condições.

6.4 FORMAÇÕES DE REBARBA

- A partir da análise realizada, torna-se evidente que os fluidos de corte desempenham um papel significativo na minimização da formação de rebarbas durante o processo de microusinagem, quando comparado com a condição a seco.
- Os tipos de rebarbas identificadas foram do tipo pena, semelhante ao tipo agulha, independente do fluido e da direção de aplicação.
- As maiores rebarbas são geradas no lado do canal usinado pelo fresamento concordante. Quando se aplica o fluido de corte na direção contrária ao avanço da ferramenta, observa-se reduções na área da rebarba de 28,17%, 39,44%, 39,98% e 49,09% respectivamente para o Fluido 1, Fluido 2, andiroba e copaíba em relação ao corte a seco. Com os fluidos aplicados na mesma direção do avanço, a redução da área de rebarba em relação à condição seco foi 51,63%, 49,29%, 40,42% e 35,03%, para o Fluido 2, copaíba, Fluido 1 e andiroba, respectivamente.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar a utilização de aditivos como o grafeno e outros para avaliação do comportamento dos óleos da andiroba e copaíba.
- Comparação dos óleos vegetais com outros fluidos de corte de base sintética e emulsificados.
- Avaliar o comportamento da força no microfresamento do aço H13 com os óleos vegetais de andiroba e copaíba.
- Realizar simulações computacionais para melhorara compreensão do processo de microfresamento.
- Investigar a aplicação do óleo da andiroba e copaíba em diferentes metais e em outros processos de microusinagem.
- Estudar o efeito do fluido de corte em diferentes condições de corte.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENI, A, METELLI, A., CAPPELLINI, C., ATTANASIO, A. Experimental Optimization of Process Parameters in CuNi18Zn20 Micromachining. **Micromachines** (2021), 12(11), 1293.

<https://doi.org/10.3390/mi12111293>

ABNT NBR ISSO 6506-1:2019. **Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell – Parte 1: Método de Ensaio**. Pg 16. 2019.

AFONSO, I. S.; PEREIRA, J.; RIBEIRO, A. E.; AMARAL, J. S.; RODRIGUES, N.; GOMES, J. R.; LIMA, R.; RIBEIRO, J. Analysis of a Vegetable Oil Performance in a Milling Process by MQL Lubrication. **Micromachines** 2022, 13, 1254.

<https://doi.org/10.3390/mi13081254>

ALONSO, T. Análise Experimental do Efeito das Condições de Corte no Microfresamento do Aço Ferramenta AISI H13. Dissertação (Engenharia de Materiais) – UFU/MG, 2023.

ALVES, S. M., & OLIVEIRA, J. F. G. DE. (2007). Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. **Production**, 17(1), 129–138.

[doi:10.1590/s0103-65132007000100009](https://doi.org/10.1590/s0103-65132007000100009)

ARAMCHAROEN, A., MATIVENGA, P. T., YANG, S., COOKE, K. E.; TEER, D. G., Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.14, pg. 1578-1584, 2008.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.05.011>

ARAUJO JUNIOR, A. S. **Desempenho de Óleos Vegetais Comestíveis Aplicados por MQF no Fresamento Frontal do Aço ABNT 1045**. 2013. 162f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

ABENI, A., LANCINI, M., ATTANASIO, A., Characterization of machine tools and measurement system for micromilling, **Nanotechnology and Precision Engineering**, v. 2, 2019, p. 23–28.

<https://doi.org/10.1016/j.npe.2019.03.006>

AIRAO, J.; NIRALA, C. K.; OUTEIRO, J.; KHANNA, N. Surface integrity in ultrasonic-assisted turning of Ti6Al4V using sustainable cutting fluid, **Procedia CIRP**, Volume 108, 2022, Pages 55-60, ISSN 2212-8271.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.068>

ALHADEFF, L.L.; MARSHALL, M. B.; CURTIS, D. T.; SLATTER, T. Protocol for tool wear measurement in micro-milling. **Wear**. v. 420 – 42, p. 54 – 67, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.018>

ALVES, W. ., SOUZA, M. C. ., ALMEIDA, A. ., OLIVEIRA, S. ., & RIBEIRO, I. L. Características Físico-Químicas de Óleos Essenciais de Plantas da Região do Vale do Juruá . v. 11 n. 22 (2015): EDIÇÃO Vol. 11 Nº 22.

DOI: http://dx.doi.org/10.18677/Enciclopedia_Biosfera_2015_107

AMORIM, M. B.; VIEIRA, A. H.; CARVALHO, M. P.; CANDIDO, B.H.; MACHADO, A. R. Avaliação de Fluidos de Corte em Ensaio de Esclerometria Pendular. 9° Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Fortaleza. 2016.

DOI: [10.20906/CPS/CON-2016-1586](https://doi.org/10.20906/CPS/CON-2016-1586)

ANAND KRISHNAN, N., VIPINDAS, K., MATHEW, J.. Modelling and experimental analysis of exit burr height and studies on size effect during micro endmilling on Inconel 718, **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Volume 46,(2023),Pages 135-147,ISSN 1755-5817

<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.08.001>.

ANAND, K. N. & MATHEW, J. Evaluation of size effect and improvement in surface characteristics using sunflower oil-based MQL for sustainable micro-endmilling of Inconel 718. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering** (2020) 42:156.

<https://doi.org/10.1007/s40430-020-2239-0>

ASADI, A., ASADI,M., REZANIAKOLAEI,A., ROSENDAHL, L. A., AFRAND, M., WONGWISES, S. Heat transfer efficiency of Al₂O₃-MWCNT/thermal oil hybrid nanofluid as a cooling fluid in thermal and energy management applications: An experimental and theoretical investigation. **Int. J. Heat Mass Transf.** vol. 117, pp. 474–486, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.036>

ASLAN,D & ALTINTAS, Y. On-line chatter detection in milling using drive motor current commands extracted from CNC. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** Volume 132 (2018), Pages 64-80.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.04.007>

ASLANTAS, K., CICEK, A., The effects of coolant/lubrication techniques on cutting performance in micro-milling of Inconel 718 super alloy, **Procedia CIRP**, v. 77, 2018, p.77-73.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.219>

ASLANTAS, K.; HOPA, H.E.; PERCIN, M.; UCUN, I.; ÇICEK, A. Cutting performance of nano-crystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy. **Precision Engineering**. v. 45, p. 55 – 66, 2016.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.01.009>

ASLANTAS,K.,DEMIR,B., GULDIBI, A.S., NIINOMI, M., DIKICI,B. A comparative study on the machinability of β -type novel Ti₂₉Nb₁₃Ta_{4.6}Zr (TNTZ) biomedical alloys under micro-milling operation, **J. Manuf. Process.** 92 (2023) 135–146,

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.02.043>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4288: Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. Rio de Janeiro, p. 10. 2008.

ASTM E415-17. **Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry active Buy Now**. Pg 11. 2017.

ATTANASIO, A.; GELFI, M.; POLA, A.; CERETTI, E.; GIARDINI, C. Influence of Material Microstructures in Micromilling of Ti6Al4V Alloy. **Materials**. v. 6, n. 9, p. 4268-4283, 2013.

<https://doi.org/10.3390/ma6094268>

AURICH, J. C., BOHLEY, M., REICHENBACH, I.G., KIRSCH, B. Surface quality in micro milling: influences of spindle and cutting parameters, CIRP Annals 66 (2017) 101–104, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.029>.

AURICH, J. C.; DORNFELD, D.; ARRAZOLA, P. J.; FRANKE, V.; LEITZ, L.; MIN, S. Burrs-Analysis, control and removal. CIRP Annals - Manufacturing Technology. v. 58, p. 519-542, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.004>

ASM INTERNATIONAL. Properties and Selection: **irons, steels, and highperformance alloys**. Estados Unidos da América: Asm International, 2005. 2521 p.

BALDIN, V., ROSA, L., DA SILVA, R., RAHUL, D.B., AMORIM, F. L., HOUCK, C. F., MACHADO, A. R.. (2023). Dry and MQL Milling of AISI 1045 Steel with Vegetable and Mineral-Based Fluids. **Lubricants**,

[doi: 10.3390/lubricants11040175](https://doi.org/10.3390/lubricants11040175)

BAUER, A., RÖNSCH, H., ELSNER, P., DITTMAR, D., BENNETT, C., SCHUTTELAAR, M.L.A., LUKÁS, J., JOHN S.M., WILLIAMS, H.C. (2018) Intervenções para prevenção de dermatite irritante ocupacional nas mãos. **Sistema de banco de dados Cochrane** Rev 4:CD004414

<https://doi.org/10.1002/14651858.CD004414.pub3>

BALDO, D. **Estudo do Microfresamento da Liga de Titânio Ti-6Al-4V Utilizando Análise de Sinais de Força e Emissão Acústica**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Mecânica, UFSJ/ São João Del-Rei, MG. 2013.

BEAUCHAM, C.C., TAPP, L.C., WIEGAND, D.M., COUCH, J.R., & MUELLER, C. (2018). Evaluation of metalworking fluid exposure, dermatitis, respiratory symptoms, and psychosocial factors in an engine machining plant.

[DOI:10.26616/nioshhhe201500703304](https://doi.org/10.26616/nioshhhe201500703304)

BOUFLEUER, N. T. **Aspecto Ecológico de Andiroba (Carapa Guianensis Aublet., Meliaceae, como Subsídio ao Manejo e Conservação**. Rio Branco, 2004: Dissertação (Mestrado em Ecologia), Programa de Pós-graduação em Ecologia e Manejo de Recursos Naturais, Universidade Federal do Acre, 2004.

BIERMANN, D., STEINER, M., KREBS, E., Investigation of Different Hard Coatings for Micromilling of Austenitic Stainless Steel, **Procedia CIRP**, v. 7, 2013, p.246 – 251.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.042>

BIERMANN, D.; STEINER, M. Analysis of Micro Burr Formation in Austenitic Stainless Steel X5CrNi18-10. **Procedia CIRP**, v. 3, p. 97 – 102, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.018>

BISSACCO, G., HANSEN, H. N., De CHIFFRE, L. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. **Journal of Materials Processing Technology**. v.167. p.201-207. Elsevier, 2005. .
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.029>

BODZIAK, S., DE SOUZA, A.F, RODRIGUES, A.R, DINIZ, A. E. e COELHO, R. T. Integridade superficial de moldes para microcomponentes fabricados por microfresamento e usinagem por eletrodescarga. **J Braz. Soc. Mecânico. Ciência. Eng.** 36 , 623–635 (2014).
<https://doi.org/10.1007/s40430-013-0108-9>

BOMJARDIM, H. A.; OLIVEIRA, M. C.; BRITO, M. F.; OLIVEIRA, C. M. C.; MONTEIRO, B. M.; SILVEIRA, N. S.S.; BARBOSA, J. D. Bovine digital dermatitis in the Brazilian Amazon biome and topical treatment with Copaifera reticulata oil. **Pesq. Vet. Bras.** 40(11):842-851, November 2020.
<https://doi.org/10.1590/1678-5150-PVB-6715>.

BOTELHO, T.I.M.; FIGUEIREDO, G. S.; PRAXEDES, F. M.; TEIXEIRA, J. V. U.; MONTEIRO, E. B. Influence of the use of carapa guianensis oil (andiroba oil) compared with commercial cutting fluid in the turning process of the abnt 1045 steel grades. **Periódico Tchê Química**, 2019, Vol 16, Issue 33, p927.
[10.52571/ptq.v16.n33.2019.942_periodico33_pgs_927_935.pdf](https://doi.org/10.52571/ptq.v16.n33.2019.942_periodico33_pgs_927_935.pdf)

BRITO, A. D., COELHO, R. D. F. R., & ROSAL, L. F. (2020). Os extrativistas de andiroba em projetos de assentamentos agroextrativistas (paex) da várzea de igarapé-miri, pará, brasil. **Revista Agroecossistemas**, 11(2), 82-101.
DOI: <http://dx.doi.org/10.18542/ragros.v11i2.7303>

BROCK, J., NOGUEIRA, M.R., ZAKRZEWSKI, C.,CORAZZA, F.C., CORAZZA, M.L., OLIVEIRA, J.V. Experimental measurements of viscosity and thermal conductivity of vegetable oils. **Ciênc. Tecnol. Aliment.** Campinas, 28(3): 564-570, jul.-set. 2008.

BRYGGMAN, U., HOGMARK, S., VINGSBO, O. Mechanisms of gouging abrasive wear of steel investigated with the aid of pendulum single-pass grooving, **Wear**, Volume 112, Issue 2, 1986, Pages 145-162, ISSN 0043-1648
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(86\)90237-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(86)90237-1).

BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENKENA, B. Advancing Cutting Technology. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v. 52, n. 2, p. 483-507, jan. 2003.
[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60200-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60200-5)

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Fundamentals of materials science and engineering**. London: Wiley, 2000

CÂMARA, M. A.; CAMPOS RUBIO, J. C.; ABRÃO, A. M.; DAVIM, J. P. State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. **Journal of Materials Science & Technology**. v. 28, n. 8, p. 673-685, 2012.
[https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60115-7](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60115-7)

CANÇADO, R.B.L. Efeito das Condições de Têmpera e Revenimento na Dureza e na Microestrutura dos Aços AISI H11 e AISI H13 Empregados para Trabalho a Quente. TCC (Engenharia de Materiais) – CEFET/MG, 2018.

CELIS, P., VÁZQUEZ. E., SORIA-HERNÁNDEZ. C., BARGNANI. D., RODRÍGUEZ, C., CERETTI, E., GARCÍA-LÓPEZ, E.. Evaluation of Ball End Micromilling for Ti6Al4V ELI Microneedles Using a Nanoadditive Under MQL Condition. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**. (2021)
[doi: 10.1007/S40684-021-00383-Y](https://doi.org/10.1007/S40684-021-00383-Y)

CHAABANI, L.; PIQUARD, R.; ABNAY, R.; FONTAINE, M.; GILBIN, A.; PICART, P.; THIBAUD, S.; D'ACUNTO, A.; DUDZINSKI, D. "Study of the Influence of Cutting Edge on Micro Cutting of Hardened Steel Using FE and SPH Modeling." **Micromachines.**, Vol 13, 1079. 2022.
<https://doi.org/10.3390/mi13071079>

CHAUDHURI, R.G., PARIA, S. The wettability of PTFE and glass surfaces by nanofluids, **Journal of Colloid and Interface Science**, Volume 434, 2014, Pages 141-151, ISSN 0021-9797,
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.07.044>.

CHENG, K.; HUO, D. **Micro-Cutting - Fundamentals and Applications**. Ed. Wiley, United Kingdom, 2013, 366p.
<https://doi.org/10.1002/9781118536605>

CHERN, G. Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Volume 46, Issues 12–13, 2006, Pgs 1517-1525.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.09.006>.

CHIAVERINI, V.. **Aços e Ferros Fundidos**. 6. ed. São Paulo: ABM, 1988. 599 p.

COLLINS, D. N., (1996), Deep cryogenic treatment of tool steels: a review. **Heat Treatment of Metals**, v. 23, n. 2, p. 40-42
[DOI:10.1179/174951508X446367](https://doi.org/10.1179/174951508X446367)

CUBA RAMOS. A, AUTENRIETH, H., STRAUß. T., DEUCHERT. M, HOFFMEISTER. J., VOLKER, SCHULZE. (2012). "Characterization of the transition from ploughing to cutting in micro machining and evaluation of the minimum thickness of cut." **Journal of Materials Processing Technology**
[doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2011.07.007](https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2011.07.007)

CUI, P., ZHEN, Y, SHI., X, LI., NINGMIN, D. Evaluation of specific cutting energy considering effects of cutting tool geometry during micro-machining process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 102(5):1127-1139. 2019.

DOI: [10.1007/S00170-018-3125-0](https://doi.org/10.1007/S00170-018-3125-0)

CUNHA, A.P.S.; BALDISSERA, L.; PEREIRA, D. L.; ALBIERO, L.R.; CASTOLDI, L.; SINHORIN, A. P.; SINHORIN, V. D. G. Evaluation of the antioxidant potential of *Copaifera multijuga* in Ehrlich tumor-bearing mice. **Acta Amazônica**. VOL. 49(1) 2019: 41 – 47.

<https://doi.org/10.1590/1809-4392201800672>.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Tranferência de calor e massa**: Uma abordagem prática: 4. Ed. MCGRAW-HILL BRASIL. 2012.

DHAR, N. R.; AHMED, M. T.; ISLAM, S. An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 5, p. 748–753, 2007.

DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2006.09.017](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.017)

DADGARI, A.; HUO, D.; SWAILES, D. Investigation on tool wear and tool life prediction in micro-milling of Ti-6Al-4V. **Nanotechnology and Precision Engineering**. v.1. p. 218 – 225, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.npe.2018.12.005>

DE SOUSA, S. F.; PAES, J. B.; ARANTES, M. D. C.; LOPEZ, V. F. B. 2018. Análise Física e Avaliação do Efeito Antifúngico dos Óleos de Andiroba, Copaíba e Pinhão-Manso. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 48, n. 2, p. 153-162.

DOI: [10.5380/rf.v48.i2.52280](https://doi.org/10.5380/rf.v48.i2.52280).

De OLIVEIRA, D.; GOMES, M.C.; Da SILVA, M. B. Influence of Cutting Fluid Application Frequency On The Surface Quality of Micromilled Slots on Inconel 718 Alloy. **Procedia Manufacturing** 48 (2020) 553–558.

DOI: [10.1016/j.promfg.2020.05.082](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.082)

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, L.L. “**Tecnologia da Usinagem dos Materiais**”. 7. ed. São Paulo: Art. Liber, 268p, 2013.

DOS SANTOS, A. G.; DA CUNHA, D. F.; ZIBEROV, M.; MARK, J. J.; DA SILVA, M. B. Avaliação da Qualidade de Microcanais Fabricados por Microfresamentos no Aço Inoxidável Duplex UNS 32205. **8º COBEF**, Salvador, Bahia, 2015.

DOS SANTOS, A. G., CUNHA, D. F., ZIBEROV, M., DA SILVA, M. B, JACKSON, M. J., Avaliação Da Influência Do Fluido De Corte Na Formação De Rebarba No Processo De Microfresamento De Inconel 718 E Aço Inoxidável Duplex Uns S32205, **Anais do 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, 2017.

DIEHL, I. L. **Análise de Camadas Obtidas por Nitretação Gasosa Controlada nos Aços SAE H13 e SAE 4140**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

DING, H., SHEN, N., SHIN, Y.C. Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, 212, PP.601-612. (2012).

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.016>

FILHO, P. R. C. F. R., SANTOS, A. R., DE MORAES, M. S., & JUNIOR, D. M. (2019). Avaliação da lubricidade do óleo de coco (*orbignya phalerata* mart) e do óleo de andiroba (*Carapa guianensis* Aubl) Por ensaio de desgaste. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, 8(1).

DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v8i1.55150>

FOROOSHANI, H. M., ALIOFKHAZRAEI, M., & ROUHAGHDAM, A. S. (2017). Superhydrophobic aluminum surfaces by mechanical/chemical combined method and its corrosion behavior. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, 72, 220–235.

[doi:10.1016/j.jtice.2017.01.014](https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.014)

FRANCO, S. D. **Contribuição ao Estudo do Desgaste Abrasivo de Materiais Polifásicos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG. Brasil. 1989.

FINZI, M. B. A. **Estudo do desempenho de fluidos de corte nos processos de usinagem**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2017. Tese de Doutorado.

FILIZ, S.; CONLEY, C. M.; WASSERMAN, M. B.; OZDOGANLAR, O. B. Na Experimental Investigation of Micro-Machinability of Copper 101 Using Tungsten Carbide Micro-End-Mills. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 47, n. 7-8, p. 1088-1100, 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.024>.

GABARDO, J. F. **Estudo da Tenacidade do Aço Ferramenta H13**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, 2008.

GAJRANI, K. K. et al. Thermal, rheological, wettability and hard machining performance of MoS₂ and CaF₂ based minimum quantity hybrid nano-green cutting fluids. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 266, p. 125–139, 2019.

[doi:10.1016/j.jmatprotec.2018.10.036](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.10.036)

GALVÃO, L. P. F. de C; Avaliação Termoanalítica da Eficiência de Antioxidantes na Estabilidade Oxidativa do Biodiesel de Mamona. Natal, Programa de Pós Graduação em Química, UFRN, Dissertação de Mestrado, 2007.

GELPI, R. J. A New Therapeutic Alternative for the Treatment of Pulmonary Hypertension?. *Arq Bras Cardiol*. 2021; 117(6):1113-1114

<https://doi.org/10.36660/abc.20210935>.

GENG, Y., ZHANG, S., WANG, J. XIAO, G., LI, C., YAN, Y. Effect of the inclined angle of micromilling tool on the fabrication of the microfluidic channel. **Int J Adv Manuf Technol** 125 , 3069–3079 (2023).

<https://doi.org/10.1007/s00170-023-10958-5>

GIÁCOMO, R. G., PEREIRA, M. G. G., SILVA, C. F., & GAIA-GOMES, J. H. (2017). Deposição de serapilheira e carbono em plantios de sabiá, andiroba e floresta secundária. **Floresta**, 47(2), 187-196.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v47i2.46853>

GILLESPIE, L.K. Deburring precision miniature parts. **Precision Engineering**. Volume 1, Issue 4, (1979), Pages 189-198.

[https://doi.org/10.1016/0141-6359\(79\)90099-0](https://doi.org/10.1016/0141-6359(79)90099-0)

GILLESPIE, LK E BLOTTER, PT (1976). The Formation and Properties of Machining Burrs, J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME, 1976, 98(1), p 66–74.

[doi:10.1115/1.3438875](https://doi.org/10.1115/1.3438875)

GOMES, MC, DOS SANTOS, AG, DE OLIVEIRA, D. FIGUEIREDO, G. V., RIBEIRO, K. S. B., LOS RIOS, G. A. B. DA SILVA, M. B. COELHO, R. T., PENDURADO, W. N. P. Micro-machining of additively manufactured metals: a review. **Int J Adv Manuf Technol** 118 , 2059–2078 (2022).

<https://doi.org/10.1007/s00170-021-08112-0>

GOMES, M.C. “**Estudo do processo de microfresamento em aço inoxidável abnt 316l produzido por fundição e manufatura aditiva**”. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU/Campus de Santa Mônica, Minas Gerais. 2019.

GONÇALVES, M.C., GOMES, M., STOETERAU, R., BATALHA, G.F., Da SILVA, M.B. Influence of the material manufacturing process on micromilling Ti6Al4V alloy. **Int J Adv Manuf Technol** 129, 23–35 (2023).

<https://doi.org/10.1007/s00170-023-12215-1>

GOSALIA, A. The European base oils and lubricants industry: trends in a global context. **Lube Mag**, v. 95, p. 8-16, 2010.

GUANGZHOU, WANG., TIANYU, YU., XINGYING, ZHOU., RUIYANG, GUO., MINGJUN, CHEN. (2022). “Investigation on minimum uncut chip thickness and size effect in micro milling of glow discharge polymer (GDP).” **Journal of Manufacturing Processes**, 84:786-797.

[doi: 10.1016/j.jmapro.2022.10.052](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.052)

HASSANPOUR H, SADEGHI MH, REZAEI H, RASTI A (2016) Experimental study of cutting force, microhardness, surface roughness, and burr size on micromilling of Ti6Al4V in minimum quantity lubrication. **Mater Manuf Process** 31(13):1654–1662.

DOI: [10.1080/10426914.2015.1117629](https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1117629)

HUTCHINGS, L M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Londres: Edward Arnold, 1992.

JABBAR, M.A., HASHIM, Z., & ZAINUDDIN, H. (2018). Metalworking fluid exposure and consequences on skin health in a metal machining factory: review article. DOI:10.35935/edr/24.3527.

Ji, X. (2023). The Effects of MQL on Tribological Attributes in Machining. In: Minimum Quantity Lubrication Machining. **Springer**, Singapore
https://doi.org/10.1007/978-981-19-7087-0_2

JIANG, H.; LI, W.; YU, Z.; YU, H.; XU, J.; FENG, L. Evaluation of Three-Dimensional Surface Roughness in Microgroove Based on Bidimensional Empirical Mode Decomposition. **Micromachines**. 2022, 13, 2011.
<https://doi.org/10.3390/mi13112011>

JAHANMIR, S. Surface Integrity in Ultra high Speed Micromachining, **Procedia Engineering**, pg. 156-161, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.095>

JURI, S., NOOR, A., NORRDIN, M., AZMAN, Y., MOHD, S., KASIM, N., HAFIEZ, M., N. (2015). " Investigation of Cutting Edge Radius Effect in Macro-machining and Micro-machining." 17-26.
doi: 10.1007/978-981-10-0534-3_2

KANG, I. S. KIM, J. S., KIM, J. H., KANG, M. C., SEO, Y. W. A Mechanistic model of cutting force in the micro end milling process. **Journal of Materials Processing Technology**, Lausanne, v. 187-188, p. 250-255, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.155>

KIMURA, H., SAKAI, Y., FUJII, T., Organ/body-on-a-chip based on micro fluid ictchnology for drug discovery, **Drug Metabolism and Pharmacokinetics**, v. 33, 2018, p. 43-48.
<https://doi.org/10.1016/j.dmpk.2017.11.003>

KISWANTO, G; ZARIATIN, D. L.; KO, T. J. The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation. **Journal of Manufacturing Processes**. v. 16, p. 435 – 450, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.05.003>

KOLLER, M.F., FOULDS, I.S. (2020). Fluidos de corte. In: John, S., Johansen, J., Rustemeyer, T., Elsner, P., Maibach, H. (eds) *Dermatologia Ocupacional de Kanerva*. **Springer**, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68617-2_64

KOU, Z.; WAN, Y.; CAI, Y.; LIANG, X.; LIU, Z. Burr Controlling in Micro Milling with supporting Material Method. v. 1, 2015, p. 501 – 511, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.015>

KRAUSS, G. **Steel: heat treating and processing principles**. Ohio: American Society for Metals – ASM International, 1990. 497p.

KROLCZYK, G.M.; MARUDA, R.W.; KROLCZYK, J.B; WOJCIECHOWSKI, S.; MIA, M. MIA; NIESLONY P.; BUDZIK G. Ecological trends in machining as a keyfactor in sustainable production – review, **Journal of Cleaner Production**, pg. 601-615. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.017>

KOU, Z.; WAN, Y.; CAI, Y.; LIANG, X.; LIU, Z. Burr Controlling in Micro Milling with Supporting Material Method. **Procedia Manufacturing**, v. 1, p. 501-511, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.015>

LAI, X., LI, H., LI, C., LIN, Z., NI, J., Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness. International **Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 48, 2008, p.1–14.
[doi:10.1016/j.ijmachtools.2007.08.011](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.08.011)

LEE, K., DORNFELD, D.A. (2005) Micro-burr formation and minimization through process control. **Precis Eng** 29(2):246–252.
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.09.002>

LEE, K., DORNFELD, D. A. An experimental study on burr formation in micro milling aluminum and copper, **Transactions of NAMRI/SME**, v. 30, p. 1–8, 2002.

LEMES, S. R., CHAVES, D. A., SILVA, N. J., CARNEIRO, C. C., CHEN-CHEN, L., ALMEIDA, L. M., GONÇALVES, P.J. & MELO-REIS, P. R. (2017). Antigenotoxicity protection of Carapa guianensis oil against mitomycin C and cyclophosphamide in mouse bone marrow. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 89, 2043-2051.
<https://doi.org/10.1590/0001-3765201720150797>

LI, K.M. & CHOU, S.Y. (2010) Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling. **J Mater Process Technol** 210(15):2163–2170.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.031>

LI, P.Y., OOSTERLING, J.A.J., HOOGSTRATE, A.M., LANGEN, H.H., SCHMIDT, R.H.M. Design of micro square end mills for hard milling applications. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 57, 859–870. 2011.
<https://doi.org/10.1007/s00170-011-3330-6>

LI, B.; ZHANG, S.; YAN, Z.; JIANG, D. Influence of edge hone radius on cutting forces, surface integrity and surface oxidation in hard milling of AISI H13 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 95, n. 1-4, 2018. 1153-1164.
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-1292-z>

LI, S., ZOU, B., XU, K., WANG, Y. (2019) Machined channel quality and tool life using cermet micro-mill in micro-milling aluminum alloy. **Int J Adv Manuf Tech** 101(9):2205–2216.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-3120-5>

LIU, X.; DEVOR, R. E.; KAPOOR, S. G.; EHMANN, K. F., The mechanics of machining at the microscale: assessment of the current state of the science, **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, pg. 666–678, 2004.
[https:// doi:10.1115/1.1813469](https://doi.org/10.1115/1.1813469)

LIU, K., MELKOTE, S. N., Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 49, pg. 650-660, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.09.012>

LIU, Z.; SHI, Z.; WAN, Y. Definition and determination of the minimum uncut chip thickness of microcutting. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 69, p. 1219-1232. 2013.
<https://doi.org/10.1007/s00170-013-5109-4>

LIU, D., WANG, G., YU, J., RONG, Y., Molecular dynamics simulation on formation mechanism of grain boundary steps in micro-cutting of polycrystalline copper, **Computational Materials Science**, v. 126, 2017, p. 418–425.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2016.10.001>

MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; DA SILVA, M.B., **Teoria da Usinagem dos Materiais**, Editora Edgard Blucher, São Paulo – SP, 1ª Edição, março de 2009.

MANNEKOTE, J. K., SATISH V., KAILAS, K., VENKATESH, N., KATHYAYINI, Environmentally friendly functional fluids from renewable and sustainable sources - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 81, Part 2, 2018, Pages 1787-1801, ISSN 1364-0321,.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.274>

MANSO, C. S., THOM, S., UHLMANN, E., DE ASSIS, C. L. F., DEL CONTE, E. G. Tool wear modelling using micro tool diameter reduction for micro-end-milling of tool steel H13. **Int J Adv Manuf Technol**. Volume 105, páginas 2531–2542. 2019.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04575-4>

MASUZAWA, T. State of the art of micromachining, **CIRP Annals of Manufacturing Technology**, v. 49, 2000, p. 473–488.
[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63451-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63451-9)

MASUZAWA, T.; TÖNSHOFF, H.K. Three-dimensional micromachining by machine tools. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 46, p. 621-628, 1997.
[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60882-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60882-8)

MELO DA SILVA, P.M; DA SILVA PINEHEIRO, D.; CARVALHO DE SOUZA, E.; DOS SANTOS SILVA, A.; CELI SARKIS MULLER, R. Caracterização físico-química de óleo de andiroba comercializado em Belém-Pa e em Bragança. 54º Congresso Brasileiro de Química. Natal/RN.2014

MELO, K. M., FASCINELLI, M. L., MILHOMEM-PAIXÃO, S. S. R., GRISOLIA, C. K., SANTOS, A. S., SALGADO, H. L. C., ... & NAGAMACHI, C. Y. (2018). Evaluation of

the genotoxic and antigenotoxic effects of andiroba (*Carapa guianensis* Aubl et) oil and nanoemulsion on swiss mice. **Journal of Nanomaterials**, 2018.

<https://doi.org/10.1155/2018/4706057>

MENEGUETTI, N. F. S. P., MENEGUETTI, D. U. O., & SIVIERO, A. (2019). Biotechnological potential of the *Carapa guianensis*, *Bertholletia excelsa* and *Copaifera* spp. oils. **Journal of Medicinal Plants Research**, 13(17), 413-422.

<https://doi.org/10.5897/JMPR2019.6828>

ASM, METALS HANDBOOK, **Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys**, vol. 1, 2002.

MIAN, J.; DRIVER, N.; MATIVENGA, P. T. Identification of Factors That Dominate Size Effect in Micro-Machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 51, n. 5, p. 383-394, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.004>.

MING-CHUN, G., MINGMING, L., JIEQIONG, L., QIANG, G., YONGSHENG, D. Modeling and investigation of minimum chip thickness for silicon carbide during quasi-intermittent vibration–assisted swing cutting. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 127(3-4):1691-1701. 2023.

DOI: [10.1007/s00170-023-11546-3](https://doi.org/10.1007/s00170-023-11546-3)

MITTAL, R. K.; SINGH, K.. K.; SINGH, R. K. Process Development and Stability Modeling Speed Micromachining. *New Horizons in Metallurgy, Materials and Manufacturing*. Indian Institute of Metals Series. Springer.(2023)

https://doi.org/10.1007/978-981-19-5570-9_6

NAKAYAMA, K.; ARAI,M. Burr Formation in Metal Cutting, **CIRP Annals**, Volume 36, Issue 1, 1987, Pages 33-36, ISSN 0007-8506.

[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62547-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62547-5).

NAKAMURA, M. T.; ENDO, E. H.; SOUSA, J. P. B.; CALLEJON, D. R.; UEDA-NAKAMURA, T.; DIAS FILHO, B. P.; FREITAS, O.; NAKAMURA, C. V. Copaiba Oil and Its Constituent Copalic Acid as Chemotherapeutic Agents against Dermatophytes. **J. Braz. Chem. Soc.**, Vol. 28, No. 8, 1377-1383, 2017.

<https://doi.org/10.21577/0103-5053.20160309>.

NAKAYAMA, K.; TAMURA, K. Size Effect in Metal-Cutting Force. **Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME**. v. 90, p. 119-126, 1968.

<https://doi.org/10.1115/1.3604585>

NETT, R.J., STANTON, M., GRIMES, G.R. Occupational respiratory and skin diseases among workers exposed to metalworking fluids. **Curr Opin Allergy Clin Immunol**. 2021 Apr 1;21(2):121-127.

doi: [10.1097/ACI.0000000000000717](https://doi.org/10.1097/ACI.0000000000000717)

NI, J., FENG, K., HE, L., LIU, X., & MENG, Z. (2019). Avaliação de fluidos de corte à base de água com aditivos verdes em brochamento. *Fricção*, 8(6), 1051–1062. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0318-y>

NI, J.; CUI, Z.; WU, C.; SUN, J.; ZHOU, J. (2021). Evaluation of MQL broaching AISI 1045 steel with sesame oil containing nano-particles under best concentration, **Journal of Cleaner Production**, Volume 320, 128888, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128888>).

NG, C. K., MELKOTE, S.N., RAHMAN, M., KUMAR, A.S. Experimental study of micro and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, p. 929 – 936, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.08.004>

NOGUEIRA, R. J. L.; GRAZUL, R.M.; DA SILVA FILHO, A.; NASCIMENTO, J. W. L. Evaluation of copaiba oil as enhancer of ibuprofen skin permeation. *Braz. J. Pharm. Sci.* (2022);58: e19548. <https://doi.org/10.1590/s2175-97902022e19548>.

ONLER, R., KORKMAZ, E., KATE, K., CHINN, R., ATRE, S. V., OZDOGANLAR, B.O. Green micromachining of ceramics using tungsten carbide micro-endmills. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 267, pg. 268-279, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.009>

OLIAEI, S.N.B., KARPAT, Y., Built-up edge effects on process out puts of titanium alloy micromilling, **Precision Engineering**, v. 49, 2017, p.305–315. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.02.019>

OLIVEIRA, D. “**Efeito Escala e Integridade Superficial no Microfresamento da Liga de Níquel Inconel 718**”. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU/Campus de Santa Mônica, Minas Gerais. 2019.

OLIVEIRA, F. B; RODRIGUES, A. R.; COELHO, R. T.; SOUZA, A. F. Size effect and minimum chip thickness in micromilling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 89, p.39 – 54, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.001>

PANTOJA, H. B.; SOUZA, M. C.; SANTOS, O; RABELO, R. F.; LIMA DE CAMPOS, J.; FERREIRA DE FRANÇA, L. Determinação dos Parâmetros Termofísicos dos óleos da andiroba (*carapa guianensis*) e copaíba (*Copaifera multijuga*), comercializados no Mercado do Ver-o-Peso. **Anais de Eventos do 14º Encontro de Profissionais da Química da Amazônia**, p.766-771, Belém-Pa, Ago. 2015.

PEKOL, S. X-ray fluorescence spectrometry characteristics of oily waste water from steel processing and an evaluation of its impact on the environment. **Environ Sci Pollut Res** 25, 17100–17108 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1923-4>

PERVEEN, A.; KUNAR, S.; KIBRIA, G.; CHATTERJEE, P. **Laser-Assisted Micromilling**. Wiley Online Library. Chapter 3.101 -114. 2023.

<https://doi.org/10.1002/9781394174959.ch3>

PIERI, F.; MUSSI, M.; MOREIRA, M. Copaiba oil (*Copaifera* sp.): history, extraction, industrial applications and medicinal properties, **Braz. J. Med. Plants** 11 (4) (2009) 465–472.

<https://doi.org/10.1590/S1516-05722009000400016>

PICARELLI, T. C. “**Microfresamento: Estudo e aplicação do processo**”. 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, SP, 2015.

QUEIROZ, L.B. Avaliação de Diferentes Ferramentas de Corte no Microfresamento do Aço Ferramenta ABNT H13. Dissertação (Engenharia de Materiais) – UFU/MG, 2022.

RAJAT, R., MORE., VIPUL, V., ANANTWAR., SANDEEP, S., ANASANE. "Experimental investigation of electrochemical micromilling on titanium alloy (Ti6Al4V)." **Materials Today: Proceedings**, Vol. 72 (2022):1752-1757.

[doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.478](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.478)

RAHMAN, S.S., ASHRAF, M.Z.I., AMIN, A.N., BASHAR, M.S. ASHIK, M.F.K., KAMRUZZAMAN, M. Tuning nanofluids for improved lubrication performance in turning biomedical grade titanium alloy, **Journal of Cleaner Production**, Volume 206, 2019, Pages 180-196, ISSN 0959-6526,

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.150>.

RAHMAN, M. A. ASAD, A. B. M. A., MASAKI, T., SALEH, T., WONG, Y. S., SENTHIL KUMAR, A. “A multiprocess machine tool for compound micro machining”. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v.50, n.4, p.344-356, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.10.007>

RAMOS-PERFECTO, D.; VÉLIZ, L. M.; CASTAÑEDA, M. M.; LUNA, A. C.; GASTELÚ, J. E. V. Periodontitis en la diabetes tipo 2 y la copaiba como coadyuvante del tratamiento: Reporte de casos. **AVANCES EN ODONTOESTOMATOLOGÍA**. Vol. 37 - Núm. 2 – 2021. Versão online ISSN 2340-3152 versão impressa ISSN 0213-1285.

RAMOS, A. C.; AUTENRIETH, H.; STRAU, T.; DEUCHERT, M.; HOFFMEISTER, J. SCHULZE, V. Characterization of the transition from ploughing to cutting in micro machining and evaluation of the minimum thickness of cut. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 212, 594–600, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.007>

REZAEI, H., SADEGHI, M. H., & BUDAK, E. Determination of minimum uncut chip thickness under various machining conditions during micro-milling of Ti-6Al-4V. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 95(5-8), 1617–1634.(2017).

[doi:10.1007/s00170-017-1329-3](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1329-3)

RIBEIRO, K.S.B, VENTER, G.S. & RODRIGUES, AR. Correlação experimental entre emissão acústica e estabilidade na microfresagem de materiais de diferentes granulometrias. **Int J Adv Manuf Technol** 109 , 2173–2187 (2020).
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05711-1>

RODRIGUES, A. R., JASINEVICIUS, R. G. Machining scale: Workpiece grain size and surface integrity in micro end milling. **Micro fabrication and Precision Engineering**, pg. 24-68, 2017.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-485-8.00002-4>

SACILOTTO, D. G. Obtenção e caracterização de revestimento hidrofóbico utilizando viniltriethoxysilano (VTES) como precursor em solução sol-gel sobre aço inoxidável AISI 204 por dip-coating. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2015.

SALES, W. F.; FERNANDES, J. S. P.; MACHADO, A. R.; DE MELLO, J. D. B.” Utilização da Esclerometria Pendular no Estudo da Performance de Fluidos de Corte.” XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA-COBEM. São Paulo.1999.

SALES, W. F.; MACHADO, BONNEY, J. EZUGWU, E.” Evaluation of Cutting Fluids Using Scratch Tests and Turning Process.” **J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.** Vol. XXIX, No. 4, Pg 372-378, October-December (2007).

SARKAR, S., DATTA, S. Machining Performance of Inconel 718 Under Dry, MQL, and Nanofluid MQL Conditions: Application of Coconut Oil (Base Fluid) and Multi-walled Carbon Nanotubes as Additives. **Arab J Sci Eng** 46 , 2371–2395 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s13369-020-05058-5>

SEN, B. et al. Eco-Friendly Cutting Fluids in Minimum Quantity Lubrication Assisted Machining: A Review on the Perception of Sustainable Manufacturing. **Korean Society for Precision Engineering**, v. 8, p. 249-280, 2019.
[DOI:10.1007/s40684-019-00158-6](https://doi.org/10.1007/s40684-019-00158-6)

SERJE, D., PACHECO, J. & DIEZ, E. Micromilling research: current trends and future prospects. **Int J Adv Manuf Technol** 111, 1889–1916 (2020).
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-06205-w>

SHAN, L., ABDOLREZA, B., JUNGHYUK, K., ZUOMIN, D., MARTIN, B.G., JUN., MARTIN, B.G., Jun. (2017). “Numerical Simulation of Chip Ploughing Volume in Micro Ball-End Mill Machining.” **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, 18(7):915-922.
[doi: 10.1007/S12541-017-0108-2](https://doi.org/10.1007/S12541-017-0108-2)

SHI, Y., MAHR, F., WAGNER, U.V., UHLMANN, E. Chatter frequencies of micromilling processes: Influencing factors and online detection via piezoactuators. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Volume 56, (2012), Pages 10-16.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.12.001>

SHAW, D. J. 1975. **Introdução à Química de Colóides e Superfícies**, Editora Edgard Blucher/Edusp, 1ª Ed, São Paulo, Brasil.

SHAW, M.C. “**Metal cutting principles**”. 2ª ed. New York: Oxford University Press, 2005.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. Oxford University Press, Londres, 1986, 256p.

SINGH, S., DUBEY, V. K., SHARMA, A. K, RAMKUMAR, J. An investigation on wettability characteristics of nanoparticle enriched cutting fluid. **Materials Today: Proceedings**. 2023
[doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.189](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.189)

SILVA, D. A. L.; SOARES, N. L. FERNANDES, G. K. O.; SANTANA M. F. S.; CORREA, A. P. P. Caracterização Físico-Química de Óleos de Andiroba Extraídos nos Municípios do Acre e Amazonas. **51º Congresso Brasileira de Química**. São Luiz/Ma. 2011.

SILVA, E.S.; MATHIAS, C.S.; LIMA, M.C.F.; JUNIOR, V.F.V.; RODRIGUES, D.P.; CLEMENT, C.R. Análise físico-química do óleo de resina e variabilidade genética de copaíba na floresta nacional do Tapajós. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n° 11, pág. 1621-1628, nov. 2012

SILVA, L. C.; SILVA, M. B. Investigation of burr formation and tool wear in micromilling operation of duplex stainless steel. **Precision Engineering**. v. 60, p. 178 – 188, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.08.006>

SINGH, G., GUPTA, M.K., MIA, M., SHARMA, V.S. Modeling and optimization of tool wear in MQL-assisted milling of Inconel 718 super alloy using evolutionary techniques. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 481 e 494, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-1911-3>

SOUSA, D. B. Microusinagem a verde de cerâmica avançada, 48f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

SUBBIAH, S.; MELKOTE, S. N. Effect of Finite Edge Radius on Ductile Fracture Ahead of the Cutting Tool Edge in Micro-Cutting of Al2024-T3. **Materials Science and Engineering: A**. v. 474, n. 1-2, p. 283-300, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.04.116>

TOBOUTI, P. L.; MARTINS, T. C. A.; PEREIRA, T. J.; MUSSI, M. C. M. Antimicrobial activity of copaiba oil: A review and a call for further research. **Biomedicine & Pharmacotherapy** 94 (2017) 93–99.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biopha.2017.07.092>.

TUSTIN, A.W, COONEY, R., LAMSON, G.E., HODGSON, M.J. A cluster of hypersensitivity pneumonitis associated with exposure to metalworking fluids. *Am J Ind Med*. (2021) Nov;64(11):915-923.

DOI: [10.1002/ajim.23284](https://doi.org/10.1002/ajim.23284)

UCUN, IRFAN; ASLANTAS, KUBILAY; BEDIR, FEVZI. An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy. **Wear**, v. 300, n. 1-2, p. 8-19, 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.103>

UHLMANN, E.; KÖNIG, J.; SAMMLER, Fi.; RICHARZ, S.. Tribology of Treated and Coated Cutting Tool Surfaces. **Encyclopedia Of Tribology**, [S.L.], p. 3896-3905, 2013. Springer US.

http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_615.

UHLMANN, E.; ZANATTA, A.M; MAHR,F.; GOMES, J.O. Influence of inclusion contents on the micro-machinability of three plastic mold steels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2013, v. 68, n. 9-12, p. 2451-2460.

DOI [10.1007/s00170-013-4835-y](https://doi.org/10.1007/s00170-013-4835-y)

VAZQUEZ, E., GOMAR, J., CIURANA, J., & RODRÍGUEZ, C. A. (2015). Analyzing effects of cooling and lubrication conditions in micromilling of Ti6Al4V. **Journal of Cleaner Production**, 87, 906–913.

[doi:10.1016/j.jclepro.2014.10.016](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.016)

XIAN, WU., LIANG, LI., NING, HE., CHENJIAO, YAO., MENG, ZHAO. (2016). “Influence of the cutting edge radius and the material grain size on the cutting force in micro cutting.” **Precision Engineering-journal of The International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology**, 45:359-364.

[doi: 10.1016/J.PRECISIONENG.2016.03.012](https://doi.org/10.1016/J.PRECISIONENG.2016.03.012)

WANG, Y.; ZOU, B.; HUANG, C. Tool wear mechanisms and micro-channels quality in micro-machining of Ti-6Al-4V alloy using the Ti(C7N3)-based cermet micro-mills. **Tribology International**, [S.L.], v. 134, p. 60-76, jun. 2019. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.030>.

WANG, Z., KOVVURI, V., ARAUJO, A., BACCI, M., HUNG, W. N. P., BUKKAPATNAM, S. T. S., Built-up-edge effects on surface deterioration in micromilling Processes, **Journal of Manufacturing Processes**, V. 24, 2016, p. 321–327.

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.016>

WANG, H. J.; FU J. X.; WANG, J. Y. Effect of water vapor on the surface characteristics and cell compatibility of zein films. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, Amsterdam, v. 69, n. 1, p.109-115, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.11.015>

YUAN, Z., FANG, B., ZHANG, Y., WANG, F. Efeito dos parâmetros de corte na formação de cavacos e rebarbas com microfresamento tradicional e microfresamento assistido por vibração ultrassônica. **Int J Adv Manuf Technol** 119 , 2615–2628 (2022).

<https://doi.org/10.1007/s00170-021-08468-3>

ZHAO, T., AGMELL, M., PERSSON, J., BUSHLYA, V., STÅHL, J. E., & ZHOU, J. M. (2017). "Correlation between edge radius of the CBN cutting tool and surface quality in hard turning." **Journal of Superhard Materials**, 39(4), 251-258.
<https://doi.org/10.3103/S1063457617040050>

ZHANG, Y., BAI, Q. & WANG, P. 3D surface topography analysis and functionality-related performance of the machined surface in slot micro-milling titanium alloy Ti6Al4V. **Int J Adv Manuf Technol** 127, 1609–1629 (2023).
<https://doi.org/10.1007/s00170-023-11644-2>

ZHANG,S; LI, J; WANG,Y. Tool life and cutting forces in end milling inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting coonditions. **Journal of Cleaner Production**, v.32, p. 81-87, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.014>

ZHIGANG, DONG., HAO, WANG., YONGNIAN, QI., XIAO GUANG, GUO., RENKE, KANG., YAN, BAO. (2022). "Effects of minimum uncut chip thickness on tungsten nano-cutting mechanism." **International Journal of Mechanical Sciences**, 237:107790-107790.
[Doi: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107790](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107790)

ZIECH, R. E.; FARIAS, L. D.; BALZAN, C.; ZIECH, M, F.; HEINZMANN, B. M.; LAMEIRA, O. A.; VARGAS, A. C.; Atividade antimicrobiana do oleorresina de copaíba (Copaifera reticulata) frente a Staphylococcus coagulase positiva isolados de casos de otite em cães. **Pesq. Vet. Bras.** 33(7):909-913, julho 2013.
<https://doi.org/10.1590/S0100-736X2013000700011>

ZIBEROV, M., DA SILVA, M. B., JACKSON, M., HUNG, W. N. P., Effect of Cutting Fluid on Micromilling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy, **Procedia Manufacturing**, Vol. 5, 2016a, P. 332–347.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.029>

ZIBEROV, M., DE OLIVEIRA, D., DA SILVA, MB, & HUNG, WNP (2020). Wear of TiAlN and DLC coated microtools in micromilling of Ti-6Al-4V alloy. **Journal of Manufacturing Processes**, 56, 337–349.
[10.1016/j.jmapro.2020.04.082](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.082)

ZIBEROV, M. Microfresamento da liga Ti-6Al-4V com microferramentas com diferentes revestimentos e aplicação de MQL. 132f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.