

DÉBORAH OLIVEIRA ALMEIDA CARVALHO

**COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE FLUIDOS DE
CORTE DE BASE VEGETAL E MINERAL NO
TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 1050**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

DÉBORAH OLIVEIRA ALMEIDA CARVALHO

**COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE FLUIDOS DE
CORTE DE BASE VEGETAL E MINERAL NO
TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 1050**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

UBERLÂNDIA – MG

2017

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

C331c
2017

Carvalho, Déborah Oliveira Almeida, 1982-
Comparação do desempenho de fluidos de corte de base vegetal e
mineral no torneamento do aço ABNT 1050 / Déborah Oliveira Almeida
Carvalho. - 2017.
169 f. : il.

Orientador: Álisson Rocha Machado.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.43>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Fluidos de corte - Teses. 3.
Ferramentas - Teses. I. Machado, Álisson Rocha. II. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262



ALUNA: Déborah Oliveira Almeida Carvalho

NÚMERO DE MATRÍCULA: 11313EMC004

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

LINHA DE PESQUISA: Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL DOUTORADO

TÍTULO DA TESE:

“Comparação do Desempenho de Fluidos de Corte de Base Vegetal e Mineral no Torneamento do Aço ABNT 1050”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

A Tese foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro C/D - Bloco 5R, Campus Santa Mônica, em 27 de outubro de 2017, às 08:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME
Prof. Dr. Álisson Rocha Machado
Prof. Dr. Éder Silva Costa
Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva
Prof. Dr. Joel Martins Crichigno Filho
Prof. Dr. Lincoln Cardoso Brandão

ASSINATURA

Uberlândia, 27 de outubro de 2017

Para Bruno e Bárbara...

“Tudo posso naquele que me fortalece”

Filipenses 4:13

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem sucedidos”

Provérbios 16:3

“Pois os dons e o chamado de Deus são irrevogáveis.”

Romanos 11:29

“Tudo parece impossível até que seja feito”.

Nelson Mandela

AGRADECIMENTOS

A palavra **gratidão** deveria ser a primeira e a última palavra que pensamos no nosso dia. Deveríamos acordar e ir dormir lembrando o quanto devemos agradecer a Deus por tamanho amor e por tamanha graça que Ele derrama sobre nós a cada dia. O meu primeiro agradecimento é a Ele, o Senhor, que me amou primeiro e que derrama sua graça sobre minha vida em todos os momentos. Eu nunca me senti sozinha e nem vazia, mesmo quando parecia que o mundo desabaria sobre mim, pois sempre tive certeza desse amor tão grande e imensurável. Senhor, obrigada por me trazer até aqui, obrigada por se mostrar nos menores detalhes, aqueles que para muitos parecem insignificantes. Para mim, o Seu amor é o mais significante de todos. *“Pois Nele vivemos, nos movemos e existimos”* – Atos 17:28

Agradeço ao meu marido Bruno e minha filha Bárbara, por estarem sempre ao meu lado, sendo o meu porto seguro. É por eles que eu sinto essa vontade enorme de progredir, de avançar, e é para eles que eu dedico essa etapa vencida em minha vida profissional. Obrigada pelos abraços acolhedores nos momentos que eu senti medo, angústia. Nossa lar é o melhor lugar do mundo, o único lugar que eu desejo estar, e onde estarei para sempre com vocês. É por causa de vocês que eu nunca desisti.

Obrigada minha mãe, Déa Dilma, por também sempre me empurrar para frente, lembrando que é nessa direção que devemos seguir. Obrigada pelo exemplo, mãe. Se sou forte e resistente é porque aprendi a ser assim com a melhor professora dessa disciplina: você.

Muito obrigada professor Álisson, meu orientador, que mais parece um pai, e essa opinião não é só minha. Obrigada pelos conselhos e pela ajuda durante esses longos anos. A minha carreira acadêmica é pautada pelo seu exemplo inspirador de paixão pela pesquisa. Foi essa inspiração que me motivou a seguir nesta profissão que tanto amo, o magistério, o ensino, a pesquisa.

Gostaria de agradecer ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, pela (dupla) oportunidade concedida. Aos professores, aos técnicos, aos alunos de iniciação científica e aos amigos do LEPU/UFU (Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem), cujos nomes são tantos que não caberiam aqui, e que contribuíram em várias etapas do trabalho realizado. Esta tese de doutorado seria impossível de ser realizada se não fosse pelas contribuições de tantas pessoas. Obrigada de coração. Em especial, agradeço à Marcília, inclusive pelos nossos cafés científicos, regados a *affogatos*, *cappuccinos*, e trocas de experiências sobre nossos queridos fluidos de corte. Assim continuaremos, espero.

À Castrol Industrial Inc., à Tungaloy Sulamericana e a Gerdau S.A. pela doação de insumos para a realização do trabalho. Ao Laboratório de Microbiologia do ICBIM, pela autorização de utilização e pela grande ajuda na realização dos ensaios de contaminação microbiológica, principalmente à professora Rosineide e à técnica Cristiane. Ao LTM (Danilo), Laprosolda (Diandro) e LMEst (Letícia), pelo auxílio na realização de ensaios de caracterização dos fluidos de corte (*reciprocating*, capacidade refrigerante e viscosidade). Ao Laboratório de Biomateriais e Engenharia de Superfícies (Luciane) da PUC-PR (Pontifícia Universidade Católica do Paraná), pelos ensaios de molhabilidade.

Aos colegas da FACIP/UFU, pela compreensão e auxílio dispendidos a mim durante esse tempo de pesquisa.

CARVALHO, D.O.A. **Comparação do Desempenho de Fluidos de Corte de Base Vegetal e Mineral no Torneamento do Aço ABNT 1050.** 2017. 159p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia: Uberlândia - MG

RESUMO

A matéria-prima principal para a fabricação de fluidos de corte é óleo de base mineral, porém, há alguns anos os fluidos de base vegetal tem sido cada vez mais utilizados, devido ao apelo ambiental, e, principalmente, à quantidade mais farta de matéria-prima renovável. Apesar de muitas vantagens, não existem muitos trabalhos que comparem o desempenho de fluidos de corte vegetal com fluidos de base mineral. Este trabalho comparou fluidos de corte de base vegetal com um fluido de base mineral, aplicados na forma de jorro, durante o torneamento de um aço ABNT 1050 com ferramentas de metal duro revestidas, levando-se em consideração os seguintes parâmetros de saída: vida da ferramenta, forças de usinagem, temperatura de usinagem e rugosidades superficiais da peça. Foi feita uma comparação de dois fluidos de base vegetal, sendo um emulsionável e outro sintético, com um fluido de corte semissintético de base mineral e com a usinagem a seco, em várias combinações de velocidades de corte e avanço, além de ensaios estáticos para caracterizar as capacidades lubrificante e refrigerante dos fluidos testados, além de caracterizar também o envelhecimento por contaminação microbiana dos mesmos. Os fluidos de base vegetal apresentaram melhor desempenho nos quesitos vida da ferramenta, rugosidades superficiais, crescimento microbiológico, coeficiente de troca de calor (capacidade refrigerante) e molhabilidade (capacidade lubrificante). Nos outros parâmetros de saída testados, houve resultados melhores quando a usinagem foi feita com o fluido de base mineral (nos ensaios de força e de temperatura de usinagem)..

Palavras chave: fluido de corte de base vegetal; capacidades lubrificante e refrigerante dos fluidos de corte; vida e desgaste da ferramenta; temperatura de usinagem; rugosidade superficial; crescimento microbiológico em fluidos de corte.

CARVALHO, D.O.A. **Study of the performance of vegetable-based cutting fluids in ABNT 1050 steel turning.** 2017. 159p. PhD Thesis. Universidade Federal de Uberlândia: Uberlândia - MG

ABSTRACT

The main raw material for the manufacture of these cutting fluids is mineral-based oil, however, in the last few years vegetable-based cutting fluids have been increasingly used, due to the environmental appeal, and mainly to the more abundant amount of renewable raw material. In addition, vegetable-based oils have polar molecules which, when they come in contact with the metal, they align to the surface and form a lubricant film much more effective and capable to withstand large surface tensions. Despite these advantages, there are not so many works that compare the performance of vegetable-based cutting fluids with mineral-based fluids. The present work compares vegetable-based cutting fluids with an mineral-based cutting fluid applied by flooding, during the turning of ABNT 1050 steel with coated carbide tools, considering the following output parameters: tool life, machining forces, machining temperature and surface roughness. The performances of two vegetable-based metalworking fluids, an emulsion and a synthetic, were compared with a semi-synthetic mineral-based fluid and dry machining, in various combinations of cutting speed and feed rates. Additionally, some static tests were carried out in order to characterize the lubricant and cooling abilities, as well as the microbial contamination of the tested fluids. The vegetable-based fluids presented better performances in the tool life, surface roughness, microbiological growth, coefficient of heat exchange (cooling capacity) and wettability (lubricating capacity) tests. In the machining forces and temperature tests better results were obtained when machining with the mineral-based fluid.

Keywords: vegetable-based cutting fluids; lubricant and cooling ability; tool life and tool wear; machining temperature; surface roughness; microbiological growth in cutting fluids.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Classificação dos fluidos de corte. Fonte: Gomes, Carvalho e Fernandes, 2005	10
Figura 2.2. Direções de aplicação do fluido de corte: 1) sobre cabeça; 2) na superfície de saída da ferramenta; 3) na superfície de folga e 4) pelo interior da ferramenta (Fonte: DA SILVA, 2006)	17
Figura 2.3. Rugosidade X Avanço; (1) óleo de coco, (2) óleo emulsionado, (3) óleo integral; profundidade de corte constante $ap = 0,5\text{mm}$; velocidades de corte (V_c): (a) 38,95m/min; (b) 61,35m/min e (c) 97,38m/min. Fonte: Xavior e Adithan (2009)	25
Figura 2.4. (a) Variação da temperatura com a velocidade de corte; (b) Variação do desgaste de flanco com a velocidade de corte; (c) Variação da rugosidade superficial com a velocidade de corte. Condições de corte: $f = 0,2\text{mmrot}$; $ap = 1\text{mm}$; tempo = 15min. Fonte: Vamsi Krishna et al (2010).....	27
Figura 2.5. Micrografia de bactérias coradas pelo Gram. Os bastonetes e os cocos (roxo) são gram-positivos, e os vibriões (rosa) são gram-negativos. Fonte: Tortora (2005)	30
Figura 2.6. Influência da carga microbiana na qualidade técnica de fluidos de corte e desgaste da ferramenta na furação (Meyer, 2011).....	33
Figura 2.7. Fluido de corte contaminado no reservatório da máquina. Fonte: Grub (2015)	34
Figura 2.8. Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (Fonte: Machado et al, 2015).....	41
Figura 2.9. Parâmetros Utilizados para Medir os Desgastes das Ferramentas de Corte (Fonte: Norma ISO 3685, 1993).	42
Figura 2.10. Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte em relação ao tempo. Fonte: Machado et. al (2015)	43

Figura 2.11. Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte (Fonte: König e Klocke, 1997; Machado et al, 2015).....	44
Figura 2.12. Mecanismos de desgaste que podem acontecer nas ferramentas de corte. Fonte: Trent e Wright, 2000 citado por Machado et al, 2015.....	45
Figura 2.13. Elementos do acabamento superficial.....	49
Figura 2.14. Rugosidade média Ra.....	50
Figura 2.15. Rugosidade média Rz.....	51
Figura 2.16. Rugosidade Ry definida pela rugosidade parcial, neste caso Ry = Z3	
52	
Figura 2.17. Rugosidade total Rt	52
Figura 2.18. Componentes das forças de usinagem no processo de torneamento.	
55	
Figura 2.19. Influência da seção de corte e da resistência do material da peça nas componentes da força de usinagem (Fonte: Ferraresi, 1977; MACHADO et al, 2015; SALES, 1999).....	57
Figura 2.20. Influência dos ângulos de saída (γ_0) e de posição (χ_r) nas forças de usinagem (Fontes: Ferraresi, 1977; Machado et al, 2015).	58
Figura 2.21. Plataforma piezelétrica (dinamômetro) usado para medição das forças de usinagem	59
Figura 2.22. Zonas de geração de calor em Usinagem. Fonte: Machado et al, 2015	
60	
Figura 2.23. Esquema para medição da temperatura de usinagem pelo método do termopar ferramenta-peça. Fonte: MACHADO et al, 2015	62
Figura 3.1: Microestrutura do aço ABNT 1050 usado nos ensaios – Ataque Nital 2%	
64	

Figura 3.2: Ensaios experimentais realizados	67
Figura 3.3: Equipamento usado nos ensaios de deslizamento <i>reciprocating</i>	68
Figura 3.4: Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios para verificação da capacidade refrigerante dos fluidos de corte	69
Figura 3.5: Equipamento usado para a medição da molhabilidade.....	71
Figura 3.6: Foto do viscosímetro usado para as medições	72
Figura 3.7: Erlenmayers com caldo BHI (meio de cultura para as bactérias)	73
Figura 3.8: Centrífuga e tubos Falcon usados para separar os pellets a serem inoculados para contaminação dos fluidos de corte	73
Figura 3.9: Recipientes com fluidos de corte já contaminados (50ml)	74
Figura 3.10: Placas com bactérias. Na placa da esquerda é possível observar três tipos diferentes de bactérias. A placa da direita mostra um número incontável de UFCs, sendo portanto necessária a diluição seriada.....	74
Figura 3.11: Placa com quantidade contável de UFCs, sendo possível observar dois tipos diferentes de bactérias, provavelmente Gram positivas.	75
Figura 3.12: Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) HITACHI TM 3000	76
Figura 3.13: Montagem do equipamento de medição das forças de usinagem no torno	77
Figura 3.14: Aplicação do fluido de corte durante um dos experimentos.....	78
Figura 3.15: Desenho esquemático do sistema para medição de temperatura – método do termopar ferramenta-peça. Fonte: Marques (2015).....	79
Figura 3.16: Esquema de montagem do sistema de calibração. Fonte: Adaptado de Marques (2015)	80

Figura 4.1: Comportamento dos fluidos observados no ensaio de atrito <i>reciprocating</i> .	84
Figura 4.2: Curva de resfriamento do corpo de prova quando utilizando os fluidos de corte	85
Figura 4.3: Curvas de resfriamento dos fluidos em cada concentração utilizada ..	86
Figura 4.4: Tempo do resfriamento de cada fluido de corte no ensaio para verificação da capacidade de refrigeração.....	87
Figura 4.5: Coeficientes de troca de calor (h) e número de Biot (Bi) encontrados através do ensaio de resfriamento, em ordem decrescente de valores.....	90
Figura 4.6: Fotos durante o ensaio de molhabilidade. O ângulo era medido pelo software, que também tirava uma foto a cada segundo de ensaio, durante 60 segundos. As gotas das fotos são do fluido de corte B na concentração de 3%, que foi o fluido que apresentou maior ângulo de contato após sua estabilização, nos trinta segundos finais do ensaio.....	91
Figura 4.7: Fotos das gotas de cada fluido após 60 segundos de ensaio (gota totalmente estabilizada na superfície).....	92
Figura 4.8: Evolução do ângulo de contato de cada fluido, medido ao longo de 60 segundos	93
Figura 4.9: Estabilização da gota sobre a superfície do aço ABNT 1050 nos primeiros 20 segundos de ensaio	94
Figura 4.10: Molhabilidade dos fluidos de corte utilizados	96
Figura 4.11: Viscosidade dos fluidos de corte utilizados	98
Figura 4.12: Ranqueamento dos fluidos de corte a partir da viscosidade cinemática, em todas as concentrações utilizadas	99
Figura 4.13: Curva de crescimento microbiano e carga microbiológica inoculada no período de 51 dias para os três fluidos investigados na concentração de 7%	100

- Figura 4.14: Viscosidades cinemática e dinâmica e massa específica dos fluidos de corte após o ensaio de contaminação..... 101
- Figura 4.15: Gráficos dos desgastes das ferramentas em função do tempo 102
- Figura 4.16: Comparação dos tempos de vida das ferramentas em cada condição de corte, usando como critério $VBB_{max} = 0,6 \text{ mm}$ 104
- Figura 4.17: Evolução do desgaste de flanco até o fim de vida de uma das ferramentas, similar ao observado nas demais condições testadas. Usinagem com fluido de corte A (emulsionável de base vegetal) na Condição 2: $v_c = 200 \text{ m/min}$; $f = 0,32 \text{ mm/rot}$; $a_p = 2 \text{ mm}$ – Fonte: Estereomicroscópio..... 106
- Figura 4.18: Foto da ponta das ferramenta após o critério de fim de vida, na primeira condição ($v_c = 200 \text{ m/min}$; $f = 0,2 \text{ mm/rot}$; $a_p = 2 \text{ mm}$) – Fonte: MEV ... 107
- Figura 4.19: Fotos da ferramenta após usinar na primeira condição ($V_c = 200 \text{ m/min}$ $f = 0,2 \text{ mm/rot}$), usando o fluido de corte A (emulsionável de base vegetal). 108
- Figura 4.20: Fotos da ferramenta após usinar na segunda condição ($V_c = 200 \text{ m/min}$ $f = 0,32 \text{ mm/rot}$), usando o fluido de corte A (emulsionável de base vegetal). 109
- Figura 4.21: Foto da ponta das ferramenta após o critério de parada, usinando na segunda condição de corte ($v_c = 200 \text{ m/min}$; $f = 0,32 \text{ mm/rot}$; $a_p = 2 \text{ mm}$) – Fonte: MEV 109
- Figura 4.22: Avarias observadas no fim de vida das ferramentas usadas nos teste na terceira condição ($v_c = 350\text{mmin}$ e $f = 0,20\text{mmrot}$, $a_p = 2 \text{ mm}$). Fonte: MEV.... 111
- Figura 4.23: Fotos da ferramenta após usinar na terceira condição ($V_c = 350\text{m/}$ mine $f = 0,2\text{mm/rot}$), usando o fluido de corte emulsionável de base vegetal A.... 111
- Figura 4.24: Desgastes das ferramentas usadas nos ensaios na quarta condição, onde $v_c = 350\text{m/}$ mine $f = 0,32\text{mm/rot}$, $a_p = 2 \text{ mm}$ 112

- Figura 4.25: Fotos com diferentes aumentos da superfície de saída da ferramenta após usinar na quarta condição de corte, $vc = 350\text{m/min}$ $f = 0,32\text{mm/rot}$, usando fluido de corte C (sintético de base vegetal) 113
- Figura 4.26: Região de desgaste da superfície de saída da ferramenta após usinagem a seco na quarta condição $vc = 350\text{m/min}$ $f = 0,32\text{mm/rot}$ 114
- Figura 4.27: Variação da Força de Corte, Avanço e Usinagem com a Velocidade de Corte; fluidos a 3%; $f = 0,2 \text{ mm/rot}$; $ap = 2 \text{ mm}$ 115
- Figura 4.28: Variação das Forças de Corte, Avanço e Usinagem com a Velocidade de Corte; fluidos a 7%; $f = 0,2 \text{ mm/rot}$; $ap = 2 \text{ mm}$ 115
- Figura 4.29: Variação das Forças de Corte, Avanço e Usinagem com a Velocidade de Corte; fluidos a 10%; $f = 0,2 \text{ mm/rot}$; $ap = 2 \text{ mm}$ 116
- Figura 4.30: Variação das Forças de Corte, Avanço e Usinagem com a variação do avanço da ferramenta; fluidos a 3%; $vc = 200 \text{ m/min}$; $ap = 2 \text{ mm}$ 118
- Figura 4.31: Variação das Forças de Corte, Avanço e Usinagem com a variação do avanço da ferramenta; fluidos a 7%; $vc = 200 \text{ m/min}$; $ap = 2 \text{ mm}$ 119
- Figura 4.32: Variação da Força de Corte, Avanço e Usinagem com a variação do avanço da ferramenta; fluidos a 10%; $vc = 200 \text{ m/min}$; $ap = 2 \text{ mm}$ 119
- Figura 4.33: Forças de Usinagem (força resultante) medidas em todas as condições lubri-refrigerantes testadas 120
- Figura 4.34: Curva de calibração do par de materiais ferramenta/peça (metal duro, classe P30 – Aço ABNT 1050) 81
- Figura 4.35: Temperaturas de usinagem obtidas pelo método do termopar ferramenta-peça, em função da velocidade de corte; $f = 0,2\text{mm/rev}$ e $ap = 1\text{mm}$ 122
- Figura 4.36: Rugosidades R_a , medidas durante os ensaios em cada condição 124
- Figura 4.37: Rugosidades R_q medidas durante os ensaios em cada condição 124

Figura 4.38: Rugosidades R_z medidas durante os ensaios em cada condição. 125

Figura 4.39: Comparação das rugosidades médias Ra nas diferentes condições de corte, após somente uma passada da ferramenta de corte sobre a peça. 126

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Vantagens e desvantagens de cada tipo de fluido de corte. Fonte: Gomes, Carvalho e Fernandes, 2005	14
Tabela 3.1. Composição química do material ABNT 1050 (fornecido pelo fabricante, %wt).....	63
Tabela 3.2. Propriedades mecânicas típicas do material da peça ABNT 1050....	63
Tabela 3.3. Parâmetros de corte utilizados nos testes de vida	75
Tabela 3.4. Valores dos parâmetros de corte para os testes de força	78
Tabela 4.1. Tempos de resfriamento até 40º.C	85
Tabela 4.2. Valores calculados de Bi e h	89
Tabela 4.3. Valores obtidos no ensaio de viscosidade dinâmica, viscosidade cinemática e massa específica	97
Tabela 4.4. Ranqueamento dos resultados encontrados (ensaios feitos com fluidos em somente uma concentração, 7%)	129
Tabela 4.5. Ranqueamento dos resultados encontrados (ensaios feitos com fluidos nas três concentrações).....	129

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
AISI	American Iron and Steel Institute
ANOVA	Análise de variância
ANP	Agência Nacional de Petróleo
a_p	Profundidade de corte
APC	Aresta Postiça de Corte
BHI	Brain Heart Infusion
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CBN	Nitreto cúbico de boro policristalino
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CO_2	Dióxido de carbono
dB	Decibéis
DNA	Ácido desoxirribonucleico
EIA-RIMA	Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto ao Meio Ambiente.
EP	Extrema Pressão
f	Avanço
F_c	Força de corte
F_f	Força de avanço
F_p	Força Passiva
F_u	Força de usinagem
h	coeficiente de troca de calor por convecção
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ISO	International Organization for Standardization
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MPa	Mega Pascal
MQL	Mínima Quantidade de Fluido Lubrificante (pulverização)

NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
Ra	Rugosidade média aritmética
Rq	Rugosidade média quadrática
SAE	Society of Automotive Engineers – EUA
UFC	Unidade Formadora de Colônia
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UV	Ultravioleta
VB_B	Desgaste de flanco médio
$VB_{B\max}$	Desgaste de flanco máximo

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xvii
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	4
1.2. Estruturação do Trabalho.....	4
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. FLUIDOS DE CORTE	5
2.1.1. Funções dos fluidos de corte	7
2.1.2. Classificação dos fluidos de corte	8
2.1.3. Aditivos	15
2.1.4. Direções e Métodos de aplicação dos fluidos de corte	16
2.1.5. FLUIDOS DE CORTE DE BASE VEGETAL	20
2.1.6. Manutenção e Problemas Causados pelos Fluidos de Corte	28
2.1.7. Presença e Controle de Microorganismos	29
2.1.8. Impactos Ambientais e Legislação	36
2.2. DESGASTE E MECANISMOS DE DESGASTES DAS FERRAMENTAS DE CORTE.....	39
2.2.1. Mecanismos de Desgaste	43
2.3. QUALIDADE SUPERFICIAL DAS PEÇAS USINADAS	48
2.4. FORÇAS DE USINAGEM	54
2.5. TEMPERATURA DE USINAGEM	59
CAPÍTULO III - METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	63
3.1. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS	63
3.2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	67
3.2.1. Ensaios para medição de capacidade lubrificante - <i>Reciprocating</i>	67

3.2.2. Ensaios para medição de capacidade refrigerante.....	69
3.2.3. Ensaios de Molhabilidade – Medição do Ângulo de Contato.....	70
3.2.4. Ensaios de Viscosidade.....	71
3.2.5. Ensaios de Envelhecimento por Contaminação Microbiológica	72
3.2.6. Ensaios de Vida da Ferramenta	75
3.2.7. Ensaios para Medição de Forças de Usinagem	77
3.2.8. Ensaios de Temperatura de Usinagem	79
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	82
4.1. Ensaios para caracterização dos fluidos de corte	82
4.1.1. <i>Reciprocating</i> – Capacidade Lubrificante dos fluidos de corte.....	82
4.1.2. Ensaios para verificação da capacidade refrigerante dos fluidos	84
4.1.3. Ensaios de molhabilidade	90
4.1.4. Ensaios de Viscosidade.....	97
4.1.5. Curva de crescimento microbiológico nos fluidos de corte após contaminação “ <i>in vitro</i> ”.....	100
4.2. Resultados dos Ensaios de Vida da Ferramenta	102
4.3. Desgaste das Ferramentas.....	105
4.4. Resultados dos Ensaios de Força.....	114
4.4.1. Variação da Velocidade de Corte.....	114
4.4.2. Variação do avanço da ferramenta (<i>f</i>)	118
4.5. Ensaios de Temperatura de Usinagem	122
4.6. Rugosidade das peças usinadas	123
4.7. RESUMO DOS RESULTADOS	128
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	130
CARACTERIZAÇÃO DOS FLUIDOS:.....	130
Propriedade Lubrificante – Ensaio <i>Reciprocating</i> :	130
Propriedade Refrigerante – Curva de Resfriamento	130
Molhabilidade	131
Viscosidade	131
Crescimento microbiológico “ <i>in vitro</i> ”	131
ENSAIOS DE USINAGEM	132
Forças de usinagem.....	132
Vida e Desgaste das ferramentas	132
Rugosidades	132

Temperatura de usinagem	133
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	134
REFERÊNCIAS.....	135

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Durante os processos de usinagem as ferramentas aquecem e sofrem elevados desgastes que exigem trocas constantes de suas arestas de corte. Além disso, há o aquecimento das peças usinadas, o que pode provocar dois efeitos indesejáveis: alterações nas dimensões pretendidas e geração de tensões internas que podem comprometer a utilização da peça. Para minimizar os desgastes das ferramentas e o aquecimento da peça, vários recursos podem ser utilizados, entre os quais o emprego de um fluido de corte, ou a utilização de revestimentos mais resistentes ao atrito nas superfícies das ferramentas de corte.

A utilização de fluidos de corte na usinagem começou a ser estudada no fim do século XIX, por pesquisadores que usaram água para resfriar a região de corte. Em 1883 F.W. Taylor mostrou que a velocidade de corte poderia ser aumentada de 30 a 40% através da inundação da interface peça/ferramenta com forte fluxo de água, mas a ideia trouxe consigo desvantagens como a oxidação do conjunto máquina-ferramenta-peça, além da ausência do poder de lubrificação. Ao serem constatadas estas desvantagens houve a necessidade de descobrir novos fluidos de corte, e então as pesquisas sobre o assunto levaram ao desenvolvimento das mais variadas combinações desse água e óleo, e propôs-se então um fluido de corte composto basicamente por óleos graxos e minerais, soluções sintéticas e água, além de aditivos à base de cloro, enxofre, nitrito de sódio, fósforo e aminas, com seus empregos específicos a cada tipo de operação de usinagem (IGNÁCIO, 1998; TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO, et al., 2015; FINZI, 2017)

Atualmente, os fluidos de corte possuem melhores propriedades lubrificantes e refrigerantes e maior tempo de vida do que os fluidos de corte da metade inicial do século XX, mas ainda não existe um fluido que seja ideal a todos os processos de usinagem. Novas formulações são frequentemente testadas, adequando-se mais a uma ou a outra situação estudada. Devido às pressões exercidas por agências de proteção ambiental e de saúde, os fluidos atuais são menos nocivos, isentos dos sulfetos e dos cloretos, que proporcionam boas características de refrigeração e de lubrificação, mas que causam danos à saúde do operador da máquina e ao meio ambiente. Preocupações como estas são cada dia mais frequentes: os fluidos devem apresentar boas propriedades durante o seu trabalho, mas em contrapartida eles devem ser facilmente descartados, ou pelo menos, com menores dispêndios durante o seu tratamento para descarte com segurança no meio ambiente (SRIKANT e RAMANA , 2015; FINZI, 2017; DINIZ et al., 2005)

Os fluidos de corte ajudam a refrigerar a região de corte, principalmente em altas velocidades de corte; lubrificar a região de corte, principalmente em baixas velocidades e altas tensões de corte; reduzir a força de corte; melhorar a vida da ferramenta, o acabamento superficial e a precisão dimensional da peça; auxiliam na quebra e transporte do cavaco; protegem a superfície usinada e a máquina-ferramenta contra oxidação (TRENT e WRIGHT, 2000). Mas há também efeitos nocivos, tais como: podem gerar alergias ou outros problemas de saúde ao operador da máquina pelo contato com a pele ou pela inalação dos seus vapores; deterioram porque adquirem fungos e bactérias, o que exige tratamento periódico, e, mesmo assim, de tempos em tempos, eles precisam ser reciclados, já que não podem ser descartados no solo. As grandes empresas mantêm sistema de reciclagem, outras precisam entregar o fluido de corte para empresas certificadas e ligadas às Secretarias de Meio Ambiente dos Estados e Municípios, o que gera custos. Em vista disso, duas linhas de pesquisa se revelam bastante fortes. Primeiro, o desenvolvimento de novos fluidos de corte, ecologicamente corretos, que não prejudiquem a saúde do operador, que durem mais tempo na máquina e que não precisem ser trocados com tanta frequência, e, segundo, o desenvolvimento de processos que não precisem de fluidos de corte ou que o utilizem em menor quantidade. Nessa primeira linha de pesquisa, os fluidos de corte de base vegetal

têm sido cada vez mais utilizados pela indústria, pois, além de poluírem menos o ambiente, causam menos agressão ao operador e proporcionam uma melhora significativa na vida das ferramentas. Apesar dessas vantagens, podem ser facilmente contaminados por microrganismos, já que possuem uma maior variedade de nutrientes que facilitam sua reprodução (ALVES, 2006; DEBNATH , REDDY e YI, 2014).

No mundo, a demanda por lubrificantes, e, entre eles os fluidos de corte usados na indústria, vem crescendo a cada ano, sendo a estimativa de demanda para 2018 de 785 mil toneladas, segundo relatório da Agência Nacional de Petróleo (ANP - AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, 2016). Cerca de 85% desses lubrificantes usados no mundo são de base mineral, derivados de petróleo, que causam efeitos significantemente negativos no meio ambiente, e também à saúde de quem trabalha em contato com eles. Por causa desses efeitos nocivos, a demanda por os óleos mais biodegradáveis tem aumentado. Entre estes, destacam-se os óleos vegetais, já que a variedade destes é bem grande, pois há uma gama muito grande de plantas com a capacidade de fornecer óleos para uso como lubrificantes, entre elas a soja, a canola, o girassol, o gergelim, o coco, entre outras. Uma das vantagens dos óleos vegetais são as moléculas polares, que se alinham com a superfície do material e formam um filme lubrificante muito mais eficaz em comparação com os óleos de base mineral (KURODA, 2006; SRIKANT e RAMANA , 2015).

No âmbito dos fluidos de corte que tem óleos vegetais em sua formulação, as características ora descritas conseguem proporcionar maiores vidas para as ferramentas, menores forças de usinagem e melhores qualidades superficiais das peças usinadas, de acordo com pesquisas realizadas com as mais diversas combinações de óleos vegetais e condições de corte (XAVIOR e ADITHAN , 2009; KRISHNA, SRIKANT e RAO, 2010; KURAM et al., 2010; GRUB, 2013; MARQUES, 2015; FINZI, 2017).

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a influência de fluidos de corte de base vegetal aplicados na forma de jorro durante o torneamento de um aço ABNT 1050 com ferramentas de metal duro revestidas, através dos parâmetros:

- vida da ferramenta;
- forças de usinagem;
- temperatura de usinagem e
- rugosidades superficiais.

Foi feita uma comparação de dois fluidos de base vegetal, sendo um emulsionável e outro sintético, com um fluido de corte semissintético de base mineral e com a usinagem a seco, em várias combinações de velocidades de corte e avanço.

Além desse objetivo, foi feito também um estudo de características de lubrificação e de refrigeração de cada fluido, através de ensaios estáticos, ou seja, sem a realização de usinagem.

1.2. Estruturação do Trabalho

Este trabalho será apresentado em cinco capítulos distintos, sendo o primeiro capítulo a Introdução; o segundo capítulo a Revisão Bibliográfica, que trata dos conhecimentos teóricos necessários para a realização do trabalho; o terceiro capítulo é Metodologia, que trata dos materiais e métodos usados para chegar aos Resultados, tratados e discutidos no quarto capítulo; e o quinto capítulo, em que são apresentadas as Conclusões do trabalho além de algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. FLUIDOS DE CORTE

Um fluido de corte é utilizado quando se deseja introduzir uma melhoria no processo de usinagem, seja ela de caráter funcional – aquelas que conferem um melhor desempenho ao processo – ou de caráter econômico – aquelas que induzem a um processo mais econômico, como a redução do consumo de energia durante o corte, ou a redução do custo da ferramenta na operação (FERRARESI, 1977). De acordo com Machado et al. (2015), “a seleção adequada de um fluido de corte deve recair sobre aquele que possuir composição química e propriedades corretas para lidar com as adversidades de um processo de usinagem específico”. Deve ser aplicado de maneira que chegue o mais próximo possível da aresta de corte, a fim de assegurar que suas sejam exercidas adequadamente.

Os fluidos de corte possuem várias funções, entre elas ajudar a refrigerar a região de corte, principalmente em altas velocidades de corte; lubrificar a região de corte, principalmente em baixas velocidades e altas tensões de corte; reduzir a força de corte; melhorar a vida da ferramenta, o acabamento superficial e a precisão dimensional da peça; auxiliam na quebra do cavaco, facilitam o transporte de cavaco; protegem a superfície usinada e a máquina-ferramenta contra oxidação (TRENT e WRIGHT, 2000; MACHADO et al., 2015).

Apesar das funções de resfriamento e lubrificação, os fluidos de corte convencionais quando aplicados como lubrificantes durante a usinagem resultam em vários problemas tecnológicos e ambientais. Embora os fluidos de corte

convencionais sejam amplamente utilizados por indústrias em várias aplicações, eles criam problemas que causam doenças relacionadas à pele aos operadores expostos a esse ambiente. Eles também representam um problema para o equilíbrio ecológico devido às suas características não biodegradáveis. Por meio da quantidade de fluidos de corte utilizados pelas indústrias, aproximadamente 38 milhões de toneladas de lubrificantes foram utilizadas globalmente, com um aumento estimado de 1,2% a cada dez anos (DEBNATH, REDDY e YI, 2014; KLINE & COMPANY, INC., 2006). Assim, para reduzir o uso em massa de fluidos de corte convencionais e também para minimizar seus efeitos adversos sobre o meio ambiente e os operadores, as alternativas para esses fluidos estão sendo rigorosamente exploradas pela comunidade de pesquisa. Usinagem a seco, refrigeração criogênica, usinagem baseada em lubrificantes sólidos, técnicas de lubrificação mínima (MQL - pulverização), seguida da aplicação de óleos vegetais e nanofluidos são algumas das alternativas que estão sendo exploradas na tentativa de substituição de fluidos de corte convencionais (BRINKSMEIER et al., 2015; PADMINI, KRISHNA e RAO, 2016).

Nos últimos tempos, grandes avanços tecnológicos foram obtidos, tanto nos materiais, como nas máquinas-ferramentas, além do aumento da demanda por materiais e bens de consumo. Isto fez com que a demanda dos fluidos de corte crescesse consideravelmente. Alta demanda causa competitividade, que por sua vez, causa aumento da qualidade dos produtos. Outro fator que também influiu no aumento da qualidade dos fluidos de corte modernos, é a pressão exercida por Agências de Proteção Ambiental e Agências de Saúde, para que os produtos sejam comercializados com mais segurança e que sejam menos nocivos ao meio ambiente e aos operadores (MACHADO et al., 2015; NELSON e SCHAILBLE, 1988). Avanços no desenvolvimento de novas formulações e de novos aditivos têm ajudado esses fluidos de corte usados hoje a obterem mais sucesso, já que apresentam melhores propriedades refrigerantes e lubrificantes, oferecem menores riscos à saúde dos operadores e duram consideravelmente mais que os fluidos de corte usados em décadas passadas (SANTOS, 2014).

Nos últimos anos, novas classes de fluidos lubrificantes surgiram como uma alternativa aos convencionais, que são os óleos vegetais crus ou quimicamente modificados, líquidos iônicos, nanolubrificantes, entre outros. Estes fluidos são

projetados para fornecer aprimoramentos superiores que não podem ser alcançados por fluidos convencionais. Os óleos vegetais quimicamente modificados são desenvolvidos para remover ou corrigir as deficiências inerentes aos óleos vegetais, como a baixa estabilidade térmico-oxidativa e o maior ponto de fluidez. Enquanto isso, a modificação química mantém seus atributos positivos, como lubrificação excepcional, alto índice de viscosidade, bom comportamento de corrosão e baixas perdas de evaporação (OSAMA et al., 2017; SHARMA, TIWARI e DIXIT , 2016; SEVIM, ATANU e BRAJENDRA, 2005).

A medição do desempenho de um fluido de corte não é uma tarefa fácil, pois há de se considerar vários aspectos, entre eles o tecnológico, o de gestão e o ambiental. No aspecto tecnológico, um fluido de melhor desempenho pode ser considerado aquele que provoca uma maior vida útil da ferramenta. No aspecto de gestão, um único fluido deve ser utilizado para diferentes materiais e operações de usinagem, o que garantiria um menor custo para a empresa. Há também que se ponderar sobre a estabilidade física, química e microbiológica, que devem garantir um maior prazo de utilização deste fluido em chão de fábrica. Resumindo, um método de gestão de fluido de corte permite alcançar um desempenho ótimo do fluido e menores custos operacionais, aliados à menor contaminação ambiental. Deve ponderar também sobre os custos dos fluidos de corte, já que, além do preço dos insumos, é necessário contabilizar aqueles relacionados à sua manutenção e ao descarte correto. A estimativa é de que os custos relacionados aos fluidos de corte podem chegar aos 16-17% do custo total do processo (SOUZA, GOMES e SOUZA, 2008; TANIO, 2012; GRUB, 2013; ANP - AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, 2016).

2.1.1. Funções dos fluidos de corte

Os fluidos de corte podem exercer várias funções, entre as quais, refrigerar a ferramenta e a peça, lubrificar região de contato entre a ferramenta e a peça, controlar o surgimento da aresta postiça de corte (APC), expulsar os cavacos gerados da região de corte. A importância relativa de cada função dependerá ainda do material usinado, da geometria da ferramenta, das condições de usinagem, do

acabamento superficial e do controle dimensional esperado (BIANCHI, AGUIAR e PIUBELLI, 2003; FERRARESI, 1977; MACHADO *et al.*, 2015).

Como lubrificante, o fluido de corte deve agir para reduzir a área de contato entre cavaco e ferramenta, e a sua eficiência vai depender da sua habilidade de penetrar na interface cavaco-ferramenta, no pequeno espaço de tempo disponível, e de formar um filme com a resistência ao cisalhamento menor que a resistência do material da interface. Como refrigerantes, os fluidos de corte agem diminuindo a temperatura de corte, tanto pelo aumento da dissipação de calor (através da refrigeração), como também pela redução da geração de calor (através da lubrificação). A capacidade do fluido de corte em varrer os cavacos da zona de corte, depende da viscosidade e da vazão do fluido de corte, além da operação de usinagem e do tipo de cavaco sendo formado. Em algumas operações, tais como furação, serramento e retificação, esta função é de suma importância, pois ele pode evitar a obstrução do cavaco na zona de corte e a consequente quebra da ferramenta (SALES, DINIZ e MACHADO, 2001; KURAM, OZCELIK e DEMIRBAS, 2013).

Ao usinar com baixas velocidades de corte, a função de refrigeração é relativamente sem importância, enquanto que a função de lubrificação é importante para reduzir o atrito e evitar a formação da APC. Os fluidos de corte a base de óleo são os mais indicados para esses casos. Já na usinagem com altas velocidades de corte, as condições não são favoráveis para a penetração do fluido de corte na interface para que ele exerça o papel lubrificante, sendo necessário utilizar um fluido com função refrigerante, como os fluidos à base de água (PADMINI, KRISHNA e RAO, 2016; MACHADO *et al.*, 2015).

2.1.2. Classificação dos fluidos de corte

De acordo com Costa (2004), existem várias formas de classificar os fluidos de corte, porém não há uma padronização. Embora genericamente designados como “fluidos” de corte, os materiais que cumprem as funções citadas anteriormente (lubrificação, refrigeração, etc.) podem ser na verdade sólidos, líquidos e gasosos. Os agentes gasosos visam principalmente a refrigeração, mas o fato de estarem sob pressão, auxilia também na expulsão do cavaco. Usa-se o ar comprimido em

temperaturas abaixo de 0°C, o CO₂ (dióxido de carbono ou gelo-seco) para altas velocidades de corte de ligas de difícil usinagem, e o nitrogênio para operações de torneamento. Entretanto, o uso de fluidos de corte gasosos não é economicamente viável para a indústria. Os agentes sólidos podem ser utilizados com objetivos de lubrificação de duas maneiras distintas (MACHADO *et al.*, 2015; FERRARESI, 1977):

- Lubrificantes sólidos: pó aplicado diretamente na superfície de saída da ferramenta antes da operação de usinagem (MoS_2 ou grafite) – uso restrito pelo fato de necessitar de uma parada na operação para a reaplicação do produto;
- Aditivos metalúrgicos: elementos adicionados ao material da peça durante a sua fabricação (enxofre, bismuto, chumbo, manganês, telúrio ou selênio), são chamados de materiais de livre corte (COSTA, 2004). As ferramentas também podem ser cobertas por revestimentos que auxiliam na saída do cavaco, porém esses revestimentos não podem ser classificados como lubrificantes sólidos.
- Lubrificantes com partículas sólidas dispersas, como grafite e bisulfeto de molibdênio (MnS_2), tem se tornado uma solução plausível em substituição aos fluidos convencionais, por apresentarem baixos valores de atrito em relação a estes (MARQUES, 2015).

Os fluidos de corte líquidos são os mais comuns e os mais utilizados industrialmente, e são agrupados nas seguintes categorias, de acordo com a sua classificação: óleos, emulsões e soluções. A figura 2.1 mostra um esquema dos principais tipos de fluidos de corte, e suas características são citadas a seguir.

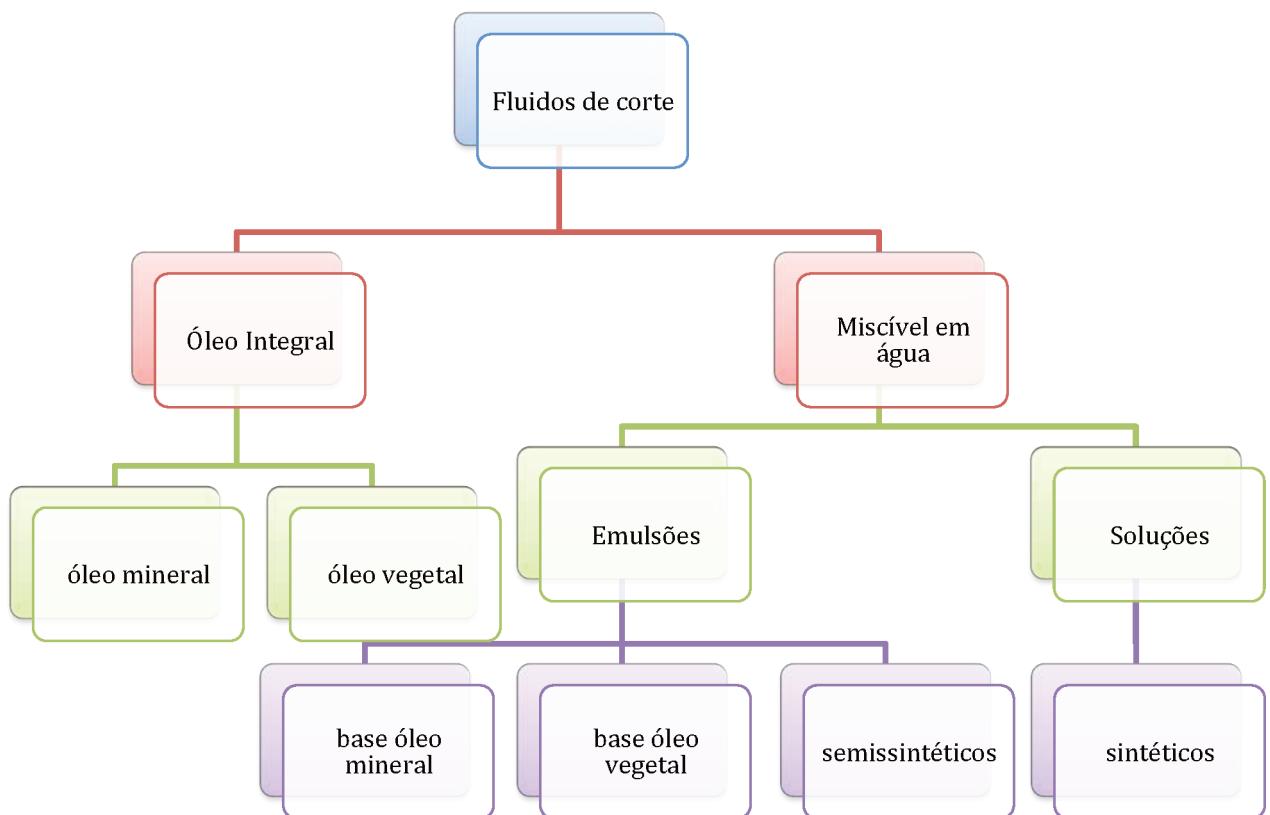


Figura 2.1. Classificação dos fluidos de corte. Fonte: Gomes, Carvalho e Fernandes, 2005

Óleos Integrais

Os primeiros lubrificantes empregados como óleos integrais na usinagem dos metais foram os óleos de origem animal e vegetal. Sua utilização tornou-se inviável depois de algum tempo por causa da rápida deterioração e do seu alto custo.

Os óleos integrais são fluidos que contém apenas óleos minerais ou vegetais, puros ou com aditivos, geralmente de alta pressão. Possuem uma capacidade lubrificante maior, mas, por causa da ausência de água, a capacidade refrigerante não é tão grande. Uma das vantagens dos óleos integrais é que a sua excelente capacidade de lubrificação proporciona um efeito de “amortecimento” entre a peça e a ferramenta, o que é particularmente útil em operações de baixa velocidade ou que requerem alta qualidade superficial da peça pronta (IOWA WASTE REDUCTION CENTER, 2003). Porém, o uso deste tipo de fluido de corte tem a desvantagem de ter um baixo poder refrigerante e risco de fogo, além de ineficiência em altas velocidades e formação de fumos, oferecendo riscos à saúde do operador da máquina (SALES, DINIZ e MACHADO, 2001; SANTOS e SALES, 2007; SANTOS e

SALES, 2007). Por esses motivos, os óleos integrais tem perdido espaço para os óleos emulsionáveis.

Os óleos minerais são hidrocarbonetos obtidos a partir do refino do petróleo. Suas propriedades dependem do comprimento da cadeia, da estrutura molecular e do grau de refino. Os óleos minerais básicos empregados na fabricação de fluidos de corte podem ser de base parafínica, naftênica ou aromática (OSAMA *et al.*, 2017; LOTIERZO *et al.*, 2016).

- **Base Parafínica:** derivam do refinamento do petróleo cru com alto teor de parafinas (ceras), resultando em excelentes fluidos lubrificantes. Eles apresentam um menor custo porque são encontrados em abundância. E são mais resistentes à oxidação, menos prejudiciais à pele humana e não agressivos à borracha e plástico e conseguem manter sua viscosidade constante em uma ampla faixa de temperaturas.

- **Base Naftênica:** derivam do petróleo cru naftênico refinado. Seu uso tem diminuído em função dos problemas causados à saúde humana, apesar de serem mais estáveis do que os parafínicos e suportarem cargas mais elevadas.

- **Base Aromática:** não são aplicados na fabricação de fluidos de corte, por serem altamente oxidantes. Apesar disso, melhoram a resistência ao desgaste e apresentam boas propriedades EP (extrema pressão) quando presentes em óleos parafínicos em grandes quantidades.

Além do alto poder lubrificante, os óleos integrais minerais possuem boas propriedades anticorrosivas, são de fácil manutenção e resistem à rancidez, visto que bactérias não irão proliferar, a menos que água contamine o óleo. São altamente recicláveis. Apesar dessas vantagens, o uso dos óleos integrais está limitado normalmente a operações que envolvam baixas temperaturas e baixas velocidades de corte. Além disso, por serem altamente viscosos, deixam filmes oleosos aderidos à peça de trabalho, máquina-ferramenta e ferramenta, o que dificulta e encarece o procedimento de limpeza (GOMES e CARVALHO, 2005; ROY e ORSZULIK, 2010).

Emulsões

De acordo com Machado *et al.* (2015), nesta categoria estão os fluidos emulsionáveis e os fluidos semissintéticos. Os **fluidos emulsionáveis**, vulgarmente chamados de “óleos solúveis”, são compostos bifásicos formados geralmente por óleo mineral adicionado à água na proporção de 1:10 a 1:100, mais agentes emulsificadores ou surfactantes, e outros aditivos. Os agentes emulsificadores são tensoativos polares que reduzem a tensão superficial, formando assim uma película monomolecular relativamente estável na interface óleo/água, provocando a dispersão das gotículas de óleo em água e favorecendo a estabilidade da emulsão. Assim, os emulsificantes promovem a formação de glóbulos de óleo menores, o que resulta em emulsões translúcidas (BARTZ e RUDNICK, 2005; MACHADO *et al.*, 2015).

Os fluidos emulsionáveis combinam a propriedade lubrificante dos óleos e refrigerante da água. A sua concentração depende da severidade da operação. Para evitar os efeitos nocivos da água presente na emulsão, aditivos anticorrosivos como o nitrito de sódio são empregados. Aditivos biocidas, para inibir o crescimento de bactérias e fungos, e aditivos EP e antidesgaste também são usados na composição dos fluidos de corte, a fim de melhorar as características lubrificantes dos mesmos.

Os **fluidos semissintéticos** também formam emulsões e se caracterizam por apresentar entre 5% e 50% de óleo mineral no fluido concentrado, além de aditivos e compostos químicos que de fato se dissolvem na água e formam moléculas individuais. A presença de grande quantidade de emulsificantes propicia ao fluido de corte uma coloração menos leitosa e mais transparente. A menor quantidade de óleo mineral e a presença de biocidas elevam a vida do fluido e reduzem os riscos à saúde humana. Também são adicionados corantes para proporcionar uma cor mais viva e aceitável pelo operador da máquina (GOMES e CARVALHO, 2005; CHINCHANIKAR *et al.*, 2014; MACHADO *et al.*, 2015; SANTOS e SALES, 2007).

Soluções

As **soluções** são compostos monofásicos de óleos que se dissolvem completamente na água. Não há a necessidade de emulsificadores, pois os compostos reagem quimicamente, formando fases únicas. Pertencendo à classe das

soluções, encontram-se os **fluidos sintéticos**, que se caracterizam por serem livres de óleo mineral em sua composição. Consistem de vários aditivos (lubricidade, biocidas, inibidores de corrosão), sais orgânicos e inorgânicos misturados à água. Possuem uma vida maior, já que sofrem menos ataques de bactérias e reduzem o número de trocas da máquina. Formam soluções transparentes, o que resulta em uma boa visibilidade durante a operação de usinagem. Possuem agentes umectantes que melhoraram bastante as propriedades refrigerantes da solução. Os óleos mais complexos são de uso geral, com boas propriedades refrigerantes e lubrificantes. Quando os fluidos sintéticos contêm apenas inibidores de corrosão e as propriedades EP não são necessárias, são chamados de refrigerantes químicos ou soluções verdadeiras (MACHADO et al., 2015; OSAMA et al., 2017; CHINCHANI KAR et al., 2014).

Dentre as vantagens de sua utilização, os fluidos sintéticos fornecem excelente controle microbiológico e resistência à rancidez por longos períodos. Não são inflamáveis, não geram fumaça e são relativamente não tóxicos. Possuem boas propriedades anticorrosivas e a melhor capacidade de refrigeração. Também possuem baixa viscosidade, reduzindo a aderência e o consumo. O fluido escoa com facilidade, sendo drenado completamente das peças e cavacos. Possíveis perdas por aderência são muito reduzidas, diminuindo a necessidade de fluido de reposição. Apesar disso, os fluidos sintéticos quando utilizados em condições mais severas podem gerar espumas e finas névoas. Substâncias adicionadas para aumentar a lubricidade e molhabilidade do fluido podem causar a emulsificação desse com óleos estranhos, além de favorecer a formação de espuma e resíduos na forma de sedimentos cristalinos ou resinas (particularmente quando a água está com elevada dureza). Eles, contudo, podem ser facilmente contaminados por óleos lubrificantes ou outros e devem ser cuidadosamente monitorados para manter suas qualidades funcionais e alta eficiência. Podem causar irritações na pele em função do seu alto poder detergente. Por fim, os fluidos sintéticos, em função de sua complexidade química são os mais poluentes, devido à dificuldade de tratamento (GOMES e CARVALHO, 2005). A tabela 2.1 contém uma comparação das principais características dos vários tipos de fluidos de corte.

Tabela 2.1. Vantagens e desvantagens de cada tipo de fluido de corte. Fonte: Gomes, Carvalho e Fernandes, 2005

Tipos	Vantagens	Desvantagens
Óleos integrais	Excelente poder de lubrificação; boa proteção contra corrosão; resistente à rancidez.	Baixo poder refrigerante; apresenta maiores riscos de incendiar, liberar fumaça e névoa; deixa filmes oleosos sobre a peça de trabalho; está limitado à operações de baixa velocidade de corte.
Óleos emulsionáveis	Boa lubrificação; melhor capacidade de refrigeração; boa proteção contra corrosão; aplicáveis a operações leves e moderadas; utilizando-se aditivos adequados, aplicam-se também a operações mais severas	São mais suscetíveis a problemas de corrosão, desenvolvimento de bactérias, contaminação por "tramp oil" e perdas por evaporação; maiores custos de manutenção; deixam filmes oleosos sobre a peça de trabalho e máquina; geram névoa
Fluidos sintéticos	Excelente controle microbiológico e resistente à rancidez; relativamente não tóxico; transparentes; não inflamáveis e não liberam fumaça; boa proteção contra corrosão; capacidade de refrigeração superior aos demais fluidos; baixa formação de névoa e espuma; facilmente retirado da peça e dos cavacos; alta vida útil; usados em uma ampla variedade de aplicações	Capacidade de lubrificação reduzida; podem produzir névoa e espuma; podem causar dermatites; podem emulsificar com "tramp oil" (outros óleos de lubrificação da máquina); são facilmente contaminados por outros fluidos de máquina

“Continuação da Tab.

2.1.”

Fluidos semi-sintéticos	Bom controle microbiológico e boa resistência à rancidez; relativamente não tóxicos; não inflamáveis e geram pouca fumaça; bom controle contra corrosão; boa capacidade de lubrificação e refrigeração; baixa formação de névoa e espuma; facilmente retirado da peça de trabalho e dos cavacos; alta vida útil; usado em uma ampla variedade de aplicações	Dureza da água afeta a estabilidade; pode produzir névoa, espuma e causar dermatites; pode emulsificar com "tramp oil"; facilmente contaminado por outros óleos de máquina
-------------------------	---	---

2.1.3. Aditivos

Para que consigam cumprir satisfatoriamente as funções supracitadas, os fluidos de corte devem possuir propriedades como: antiespumantes, anticorrosivas, antioxidantes, antidesgaste e antissolda; boa umectação; capacidade de absorção de calor; transparência e inodoro; não formar névoa nem provocar irritações na pele; boa compatibilidade com o meio ambiente e índice de viscosidade apropriado. Para conferir as propriedades citadas aos fluidos ou para reforçá-las, alguns produtos químicos chamados de aditivos são utilizados, os principais são (SALES, 1999; MACHADO et al., 2015; HUESMANN-CORDES *et al.*, 2014).

- **Antiespumantes:** Evitam a formação de espumas que impedem uma boa visão da região de corte e comprometem o efeito refrigerante do fluido. Esses aditivos

agem reduzindo a tensão interfacial do óleo de tal maneira que bolhas menores passam a se agrupar formando bolhas maiores e instáveis.

- **Anticorrosivos:** Protegem peça, ferramenta e máquina-ferramenta da corrosão. São produtos a base de nitrito de sódio ou que reagem com ele, assim como óleos sulfurados ou sulfonados. Por isso devem ser usados com precaução, pois esses compostos são suspeitos de serem cancerígenos.
- **Antioxidantes:** Impedem que o óleo se deteriore quando em contato com o oxigênio do ar.
- **Detergentes:** Reduzem a deposição de lodo, lamas e borras. São compostos organometálicos contendo magnésio, bário e cálcio entre outros.
- **Emulsificantes:** Responsáveis pela formação de emulsões de óleo na água e vice-versa. Reduzem a tensão superficial e formam uma película monomolecular semiestável na interface óleo/água. Os tipos principais são os sabões de ácidos graxos, as gorduras sulfatadas, sulfonatos de petróleo e emulsificantes não iônicos.
- **Biocidas:** Substâncias ou misturas químicas que inibem o desenvolvimento de microrganismos, principalmente fungos e bactérias que, em geral, reagem com o enxofre presente no fluido de corte.
- **Aditivos de Extrema Pressão (EP):** Em operações severas conferem aos fluidos uma lubridade melhorada para suportarem as elevadas temperaturas e pressões de corte, reduzindo o contato ferramenta/cavaco. São suficientemente reativos com a superfície usinada, formando compostos relativamente fracos na interface, geralmente sais (fosfato de ferro, cloreto de ferro, sulfeto de ferro, etc) que se fundem a altas temperaturas e são facilmente cisalháveis. Os mais empregados são aditivos sulfurizados, sulfurados, fosforosos e substâncias cloradas (SALES, 1999; MACHADO et al., 2015; HUESMANN-CORDES et al., 2014).

2.1.4. Direções e Métodos de aplicação dos fluidos de corte

A fim de cumprir seu papel, o fluido deveria penetrar na interface cavaco-ferramenta até a ponta da ferramenta. Existem quatro direções de aplicação do fluido: jorro de fluido despejado sobre a cunha de cavaco sendo formado (sobre

cabeça), entre a superfície de folga e a peça, na saída do cavaco (entre a superfície de saída da ferramenta e o cavaco) e por dentro do corpo da ferramenta de corte. Esses modos de aplicação do fluido de corte são mostrados na figura 2.2.

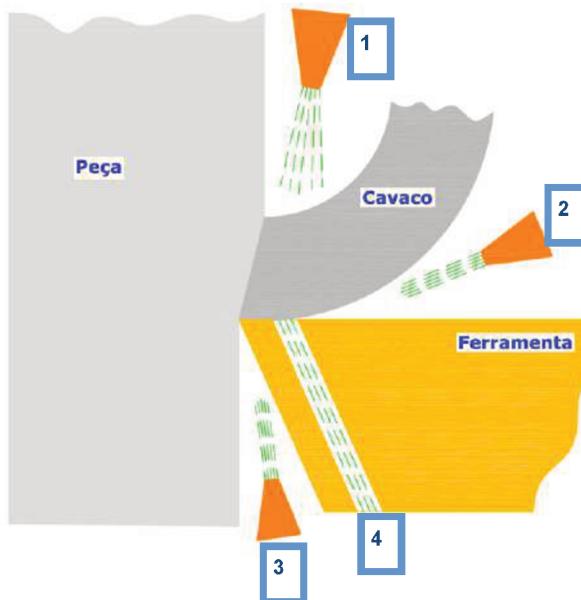


Figura 2.2. Direções de aplicação do fluido de corte: 1) sobre cabeça; 2) na superfície de saída da ferramenta; 3) na superfície de folga e 4) pelo interior da ferramenta (Fonte: DA SILVA, (2006)).

Segundo Machado *et al.* (2015), não existe um consenso sobre a melhor direção de aplicação de fluido de corte, sendo a aplicação sobre cabeça (1) a mais usual, porém é inadequada quando cavacos emaranhados são produzidos, já que estes dificultam o acesso do fluido de corte à interface cavaco/ferramenta.

Várias pesquisas já foram feitas para avaliar a eficiência das direções de aplicação e resultados diversos foram encontrados, como Lauterbach (1952), citado por Machado e Da Silva (2004), que encontrou que a mais eficiente para usinagem de aços é aplicar o fluido na superfície de folga da ferramenta (direção 3). Trent e Wright (2000) citam as vantagens de aplicação entre a superfície de folga da ferramenta e a peça sendo usinada, já que o fluido de corte pode chegar à interface ferramenta/peça, reduzindo o desgaste de flanco e contribuindo para a melhor qualidade da peça fabricada. Machado (1990) e Da Silva (2006) mostram que há muitas vantagens na aplicação do fluido de corte a alta pressão contra a saída do cavaco (direção 2), na usinagem de uma liga de titânio, Ti₆V₄Al, mas na usinagem

de uma liga de níquel (Inconel 718) os resultados não foram os mesmos. O fluido aplicado pelo interior da ferramenta (direção 4) é um método utilizado principalmente em operações de furação de ligas mais resistentes, e também auxilia na eliminação do cavaco de dentro dos furos fabricados durante a usinagem (MACHADO, 1990; DA SILVA, 2006; TRENT e WRIGHT, 2000; LAUTERBACH, 1952).

Os fluidos de corte podem ser aplicados sob diversas direções e/ou vazões, mas os métodos mais utilizados atualmente são:

- Jato de fluido a baixa pressão ou por gravidade (Convencional ou jorro)
- Sistema a alta pressão;
- Mínima Quantidade de Lubrificação – MQL

O primeiro método é o mais utilizado, devido a sua simplicidade. O fluido é jorrado contra a superfície superior do cavaco (aplicação sobre cabeça) e dispensa dispositivos especiais. O sistema a alta pressão tem como objetivo principal melhorar a quebra do cavaco. Este sistema precisa de um equipamento mais complexo, com bomba de múltiplos estágios, reservatório com capacidade elevada e encapsulamento da máquina ferramenta. Aqui, o fluido é bombeado através do porta-ferramenta e aplicado na direção 2 (entre cavaco e ferramenta). Utilizando este método no torneamento, Machado (1990) obteve bons resultados usinando ligas aeroespaciais, como titânio e níquel, assim como Ezugwu *et al.* (2005) na usinagem de superligas de níquel com fluidos aplicados com pressões até 21 kgf/cm^2 , ou seja $2,1\text{ MPa}$. Naves (2013) aplicou fluido de corte a altas pressões na usinagem de um aço inoxidável austenítico ABNT 316UF, e o resultado a que chegou foi que as ferramentas duravam um tempo maior quando esse método era utilizado, em comparação com a usinagem feita com jorro a baixas pressões e a seco. Além disso, o comprimento de contato entre o cavaco e a ferramenta também foi reduzido, e o método se mostrou muito bom para o controle dos cavacos.

Porém, na tentativa de reduzir os custos e diminuir a degradação ambiental causada principalmente pelo descarte dos fluidos, a técnica de baixos volumes de fluido tem sido investigada. Neste método, MQL, ou mínima quantidade de fluido, o fluido de corte é aplicado em vazões baixíssimas, na faixa de 10 a 500 ml/h, e pulverizado com um jato de ar comprimido sobre a superfície de saída da ferramenta. Este método tem sido investigado de maneira intensiva, mas os resultados ainda não são consistentes, apresentando variações de desempenho de

acordo com as condições de corte, quando comparados com o jorro à baixa pressão. Todavia, resultados promissores foram encontrados, como a redução das forças de usinagem e da rugosidade da peça fabricada. Experimentos realizados por Machado e Wallbank (1997) no torneamento de aço ABNT 1045, com vazões do fluido entre 200 e 300 ml/h, mostraram que houve uma redução nas componentes das forças de usinagem, principalmente ao usinar com baixas velocidades de corte e altos avanços. Foi usado um venturi para fazer a mistura do fluido com o ar comprimido, e o jato era pulverizado sobre a superfície de saída da ferramenta. Da Silva e Wallbank (1998), continuaram nesta linha de pesquisa, fazendo testes com vazão de 108 ml/h e monitorando o efeito da lubrificação por meio do acabamento da superfície, das forças de usinagem e pela temperatura da peça. Os resultados experimentais encontrados foram bastante encorajadores, e acreditam que a vazão de fluido utilizada tenderá cada vez mais a ser reduzida (MACHADO *et al.*, 2015; MARQUES, 2015; SHARMA , TIWARI e DIXIT , 2016).

Em outra investigação, Teixeira Filho (2006) mostrou que, na furação de um aço ABNT 1040 com brocas de aço rápido revestidas e não revestidas, melhores resultados foram obtidos com o uso de mínimas quantidades de fluido de corte. Também foi verificado nesse estudo que as componentes das forças foram reduzidas durante a aplicação por névoa (MQL), mostrando que o spray garante maior penetrabilidade do fluido na zona de escorregamento da região de contato cavaco-ferramenta. Um estudo realizado por Dhar, Ahmed e Islam (2007) usando a aplicação de fluidos de corte de base mineral na forma de MQL (por pulverização) no torneamento de um aço AISI 1040 mostrou que é mais eficiente do que a usinagem a seco, já que conseguiu reduzir as forças de corte, a temperatura na interface cavaco/ferramenta, o desgaste de flanco da ferramenta, e proporcionar menores valores de rugosidades, melhorando assim a precisão dimensional da peça usinada (SHARMA, TIWARI e DIXIT, 2016; DINIZ, DA SILVA, *et al.*, 2005) .

Outro estudo, realizado por Hadad e Sadeghi (2013), avaliou a influência da posição do bocal na aplicação do fluido de corte na usinagem por MQL, comparando com a usinagem a seco e convencional (por jorro), no torneamento do aço AISI 4140. Para a aplicação em jorro foi usado um fluido de corte emulsionável na concentração de 10%, com uma vazão de $5l/min$ e para a aplicação em MQL, um óleo integral com vazão de $30ml/h$ a uma pressão de $0,3MPa$. Os autores

observaram melhor desempenho da aplicação do fluido de corte pela técnica do MQL em relação aos outros métodos, e atribuíram esse desempenho a uma maior eficiência de penetração do lubrificante na zona de corte. A posição do bocal também exerceu importante influência no resultado, pois a nevoa de óleo aplicada tanto na superfície de folga como na de saída conferiu o efeito de impedir a adesão do cavaco em baixas temperaturas de corte, enquanto que o efeito de lubrificação melhorou o acabamento superficial da peça usinada.

Segundo Sales, Diniz e Machado (2001) a aplicação em névoa (MQL) de fluidos de corte gera interesse de vários grupos de pesquisas em todo o mundo, principalmente pela motivação promovida pelo rótulo ecológico. Porém alguns pontos devem ser mais profundamente discutidos para um posicionamento mais firme, como a poluição ambiental por causa das partículas de óleo em suspensão que ficam no ar, e o consumo, já que a aplicação em névoa não admite retorno de fluido. Apesar de muitas vezes o pretexto da utilização da névoa ser por motivos ambientais, a pulverização levanta no ambiente atmosférico local muitas partículas de óleo, o que exige cuidados especiais antes da implantação dos sistemas. Uma máquina totalmente fechada com guardas de proteção e um bom sistema de exaustão com controle de emissão de partículas é o mínimo que se exige. Segundo especialistas, o volume, o tamanho e o tipo de partículas na névoa, a formação de vapor ou fumaça de óleo – são informações particularmente importantes. Além desses problemas, há também a poluição sonora. Na pulverização é utilizada uma linha de ar comprimido que funciona intermitentemente durante todo o processo. Essas linhas de ar geram muito ruídos, que estão normalmente com potência superior àquelas máximas permitidas para o ouvido humano (80 dB). Além de afetar a saúde, o ruído polui o ambiente, prejudicando a comunicação (NAJIHA , RAHMAN e YUSOFF , 2016; MANNEKOTE *et al.*, 2017).

2.1.5. FLUIDOS DE CORTE DE BASE VEGETAL

Lubrificantes têm sido utilizados em todos os setores da indústria para lubrificar as máquinas e materiais. Segundo uma pesquisa, financiada pelo BNDES, a respeito do potencial de diversificação da indústria química Brasileira, a demanda global de lubrificantes foi de 39,2 milhões de toneladas em 2012 e cresceu a uma

taxa aproximada de 1,0% ao ano entre 2007 e 2012. Segundo o relatório, espera-se um crescimento mais acelerado para o período entre 2012 e 2017, sendo a projeção de crescimento dessa demanda global por lubrificantes de 2,3% ao ano para o período de 2012 a 2017. Apesar dessa projeção ser inferior à projeção de crescimento do PIB mundial (3,9% ao ano), destaca-se como motivo para tal diferença o aumento da eficácia dos lubrificantes, que proporcionam maiores períodos entre as trocas (BAIN & COMPANY, 2014).

Outra tendência relevante no mercado de lubrificantes é o aumento da demanda por lubrificantes obtidos a partir de fontes renováveis, os biolubrificantes, e a maior exigência do mercado por lubrificantes de maior qualidade. De acordo com o Relatório Técnico nº. 2 da ANP (2016), “A demanda de biolubrificantes no mundo, em 2011, foi de 505.600 toneladas. Correspondente a uma participação de 1,4% do mercado global, estimado em 35 milhões de toneladas e com a expectativa de atingir, no ano de 2018, uma demanda de 785.000 toneladas, o que representaria um crescimento de 6,6% durante os anos de 2013 a 2018”. Há uma tendência da política ambiental no mundo de maiores exigências para o descarte de lubrificantes, e isso é uma das vantagens dos biolubrificantes: seu descarte tende a ter um menor custo, tornando o produto mais competitivo sob a ótica do custo total (BAIN & COMPANY, 2014; ANP - AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, 2016).

Aproximadamente 85% dos lubrificantes usados ao redor do mundo são óleos de base mineral. O enorme uso desses derivados do petróleo criaram efeitos negativos no meio ambiente. O maior desses efeitos negativos está particularmente ligado ao seu uso inapropriado, que resulta na contaminação das águas superficiais e dos lençóis freáticos, poluição do ar, contaminação do solo e, consequentemente, na contaminação dos produtos agrícolas e dos alimentos. Os fluidos de corte fazem parte desse tipo de lubrificantes, usados extensamente em operações de usinagem para lubrificar e refrigerar a região de corte, aumentando a produtividade e a qualidade das operações de usinagem. Como tratado anteriormente, há vários tipos de fluidos de cortes utilizados para executar tais tarefas, sendo que a maioria deles é baseada em óleos de origem mineral. Devido a estas vantagens, o consumo de fluidos de corte tem crescido na indústria de usinagem: pesquisas indicam que a União Europeia consome aproximadamente 320 mil toneladas por ano de fluidos de corte, dos quais dois terços precisam ser eliminados. Apesar de sua ampla

utilização, esses fluidos representam significativo risco à saúde e ao meio ambiente durante o seu ciclo de vida: relata-se que cerca de 80% de todas as doenças profissionais dos operadores foram devido ao contato da pele com fluidos de corte (SHASHIDHARA e JAYARAM, 2010; BURTON *et al.*, 2014).

A crescente demanda por materiais biodegradáveis abriu uma porta para o uso de óleos vegetais como uma alternativa ao uso de materiais poliméricos à base de petróleo, especialmente em operações de usinagem. A consciência pública em relação a problemas ambientais tem crescido constantemente. Os lubrificantes são usados em diversas áreas, porém a sua aceitabilidade ambiental tem se tornado cada vez mais importante. Como resultado, pesquisas por fluidos funcionais biodegradáveis surgiram como uma das prioridades principais na área de lubrificação no início dos anos 90, o que levou a um número cada vez maior de fluidos e lubrificantes ecológicos no mercado. Chetan *et al.* (2015) apresentaram um review de todas as técnicas emergentes de fabricação sustentável no corte de metais para a produção verde e mais limpa, a fim de identificar as diferentes técnicas sustentáveis na usinagem de metais, de modo que o processo de corte se torne mais econômico e ambiente amigável. Tais técnicas de usinagem sustentáveis usam quantidades mínimas de fluido de corte, nitrogênio líquido, óleo vegetal ou ar comprimido como meio de lubri-refrigeração. Os autores observaram que essas técnicas, na maior parte dos casos, permitiam melhores qualidades superficiais das peças fabricadas, maiores vidas das ferramentas, menores temperaturas de corte e menores forças de usinagem, em comparação aos métodos mais comuns de usinagem com fluidos de corte. (XAVIOR e ADITHAN, 2009; LAWAL, CHOUDHURY e NUKMAN , 2013; CHETAN, GHOSH e RAO , 2015).

Sabe-se que a natureza pode fornecer uma gama muito maior de matérias-primas para a fabricação de lubrificantes do que a indústria petroquímica. Esta variedade de matérias-primas, somada aos novos métodos e processos modernos de refino, possibilitam a eliminação dos problemas dos óleos vegetais de antiga tecnologia, como a resinificação, a viscosidade aumentada e o desenvolvimento de acidez. Os óleos integrais vegetais possuem várias vantagens, entre elas:

- Os óleos vegetais são mais compatíveis com a pele humana do que os óleos minerais, e também têm uma tendência reduzida à formação de vapor,

névoa e fumaça, além de ter um ponto de fulgor maior, reduzindo o risco de incêndio nas máquinas.

- Os óleos vegetais têm moléculas polares que funcionam como se fossem ímãs e se alinharam à superfície do metal, formando um filme lubrificante capaz de suportar grandes tensões superficiais, facilitando a usinagem e melhorando a vida das ferramentas. As moléculas dos óleos minerais não são polares, e por esse motivo a sua capacidade lubrificante é inferior à dos óleos vegetais. Isso também é uma vantagem quando se deseja maior produtividade.
- Assim como os óleos minerais, os óleos vegetais não podem ser queimados, apesar de poluir menos o ambiente. Porém, a principal vantagem ecológica dos óleos vegetais é que sua matéria-prima é reutilizável (KURODA, 2006; BRINKSMEIER *et al.*, 2015).

Óleos vegetais, especialmente de colza, canola (variedade da colza) e mamona, são alguns dos candidatos mais promissores a óleos-base para esses lubrificantes biodegradáveis. Eles são facilmente biodegradáveis e custam menos que os óleos de base sintética. Os fluidos ecológicos oferecem um desempenho bastante aceitável como lubrificantes (LAWAL, CHOUDHURY e NUKMAN , 2013).

Belluco e De Chiffre (2002) investigaram o efeito de novas formulações de óleos vegetais na integridade superficial e na precisão das peças fabricadas no alargamento e rosqueamento de um aço inoxidável AISI 316L. Encontraram que os fluidos de corte causam efeitos significativos na integridade superficial, sendo que os de base vegetal demonstraram melhores desempenhos do que os de base mineral. Durante a furação do mesmo material, foram testados seis fluidos de corte, medindo-se a vida e o desgaste das ferramentas de aço rápido, forças de corte e formação de cavaco. Em todas as aplicações os óleos de base vegetal produziram melhores resultados que os óleos comercialmente disponíveis, de base mineral, em termos de vida da ferramenta e redução das forças de usinagem.

No trabalho de Alves (2006), foi proposta uma formulação para os fluidos de corte usando óleo de mamona, água e alguns aditivos, para serem usados durante operações de retificação usando rebolos de CBN. Normalmente eram usados óleos integrais nesse processo, mas o trabalho mostrou que a formulação do fluido de

corte (emulsão) desenvolvida usada na concentração de 21º.Brix (aproximadamente 20% de óleo de mamona na composição), apresentou um desempenho mecânico semelhante ao obtido pelo óleo integral, no que diz respeito ao desgaste radial do rebolo e força normal. Isso significa que é possível utilizar no processo um fluido com as duas principais características que ele poderia ter: refrigeração, advinda da água, e lubrificação, fornecida pelo óleo de mamona. Além disso, os pesquisadores formularam um produto com uma gama menor de constituintes do que as formulações tradicionais, o que facilita o tratamento e o descarte do fluido de corte, já que ele foi considerado facilmente biodegradável.

Xavior e Adithan (2009) investigaram a influência de fluidos de corte no desgaste da ferramenta e na rugosidade superficial da peça durante o torneamento de um aço inoxidável AISI 304, usando ferramentas de metal duro e três tipos de fluidos: óleo de coco, uma emulsão e um óleo integral mineral. O trabalho experimental foi baseado no planejamento experimental de Taguchi com uma matriz ortogonal L27 (3)4, usando a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de corte e os tipos de fluidos de corte como parâmetros. Um cálculo do modelo usando modelos de múltiplas regressões lineares foi desenvolvido para determinar o desgaste da ferramenta e a rugosidade superficial; enquanto a ANOVA foi utilizada para determinar quais parâmetros significativos que influenciam no desgaste da ferramenta e na rugosidade superficial. Os resultados a que eles chegaram, mostrados no gráfico da figura 2.3, mostram que o óleo de coco teve a maior influência na rugosidade superficial e no desgaste, seguido do óleo integral e da emulsão, que obtiveram piores resultados. Os autores observaram que o avanço tem a maior influência na rugosidade superficial, e a velocidade de corte possui a maior influência no desgaste das ferramentas. Observaram ainda que o desempenho relativo da eficiência do fluido de corte em reduzir o desgaste da ferramenta e melhorar o acabamento superficial foi melhor quando o óleo de coco foi utilizado, comparando-se ao óleo mineral convencional.

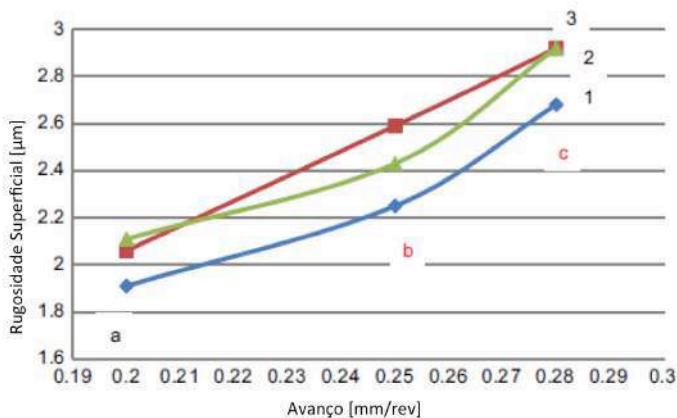


Figura 2.3. Rugosidade X Avanço; (1) óleo de coco, (2) óleo emulsionado, (3) óleo integral; profundidade de corte constante $a_p = 0,5\text{ mm}$; velocidades de corte (V_c): (a) 38,95m/min; (b) 61,35 m/min e (c) 97,38 m/min. Fonte: (XAVIOR e ADITHAN, 2009)

Em outro estudo, Kuram *et al.* (2010) investigaram o efeito dos tipos de fluidos de corte e dos parâmetros de corte na rugosidade superficial e nas forças de usinagem, testando três diferentes fluidos de corte de base vegetal, desenvolvidos a partir de óleo de girassol cru e refinado, e dois fluidos comerciais, um de base vegetal e outro de base mineral, durante a furação de um aço inoxidável AISI 304 com brocas de aço rápido. Os fluidos de base vegetal foram formulados com vários aditivos. Foram considerados a rotação, o avanço e o comprimento do furo como parâmetros de entrada. A partir das análises, os pesquisadores observaram que, na usinagem com o fluido de corte com base no óleo de girassol, as forças foram mais baixas do que na aplicação dos outros fluidos, mas as menores rugosidades superficiais foram encontradas durante a usinagem com aplicação do fluido comercial de base vegetal. Mesmo assim, o óleo de girassol mostrou-se mais efetivo em reduzir a rugosidade superficial quando a velocidade de corte aumentava de 520 m/min para 720 m/min (KURAM, OZCELIK, *et al.*, 2010; KURAM, SIMSEK, *et al.*, 2010).

Krishna *et al.* (2010) investigaram o desempenho de suspensões de ácido nano-bórico no óleo SAE-40 e no óleo de coco durante o torneamento de um aço AISI 1040 com ferramentas de metal duro revestidas. A variação das temperaturas das ferramentas de corte, do desgaste de flanco médio e da rugosidade superficial

da peça usinada, em relação à velocidade de corte, foram pesquisadas usando suspensões de lubrificante não-sólido em óleo lubrificante. Os experimentos foram feitos sob as seguintes condições: $V_c = 60, 80 \text{ e } 100 \text{ m/min}$, $f = 0,14; 0,16 \text{ e } 0,2 \text{ mm/rot}$ e $a_p = 1,0 \text{ mm}$ (constante). Lubrificantes sólidos de ácido bórico com partículas de 50nm, óleo lubrificante SAE 40 e óleo de coco com vazão de 10 ml/min foram usados como métodos de lubrificação. A temperatura foi medida usando-se um termopar colocado abaixo do inserto, no porta-ferramenta. Os pesquisadores encontraram que a ação refrigerante do fluido com partículas nano-sólidas foi evidenciada pela medição da temperatura da ferramenta. A figura 2.4 mostra que as temperaturas cresceram com a velocidade de corte, independente do fluido de corte utilizado, e as temperaturas foram menores quando foi usado o óleo de coco, comparando com a utilização do óleo SAE 40 para condições de corte idênticas. As temperaturas também cresceram com o aumento do avanço, independente do fluido de corte.

O desgaste de flanco foi medido nas várias condições lubri-refrigerantes em várias velocidades de corte, e crescia gradualmente com o aumento do avanço. O efeito combinado do lubrificante sólido e do óleo vegetal levou a uma redução do desgaste de flanco, quando usando 0,5% de partículas de ácido nano-bórico suspensas no óleo de coco, comparado às condições anteriores. Esses efeitos são mostrados nos gráficos da figura 2.4 (b). já a rugosidade superficial inicialmente reduziu, e depois aumentou com o aumento da velocidade de corte em todas as condições lubri-refrigerantes, e cresceu com o aumento do avanço. Da mesma forma, foi encontrado que a rugosidade superficial reduziu quando o óleo de coco foi utilizado, comparativamente ao uso do óleo SAE 40, e dentro dos fluidos com base em óleo de coco, o que tinha 0,5% de partículas de ácido nano-bórico suspensas proporcionou melhores resultados, como pode ser visto na figura 2.4 (c). Assim, os pesquisadores concluíram que temperaturas de corte, desgaste de flanco e rugosidade superficial diminuíram significativamente com os nano-fluidos, comparando aos óleos de base, devido à ação lubrificante do ácido bórico. Também concluíram que, em todos os casos, o fluido de corte com base de óleo de coco e com partículas de ácido bórico em suspensão mostrou um melhor desempenho do que o fluido com base num óleo SAE 40 (mineral), por causa das melhores propriedades lubrificantes do óleo de base.

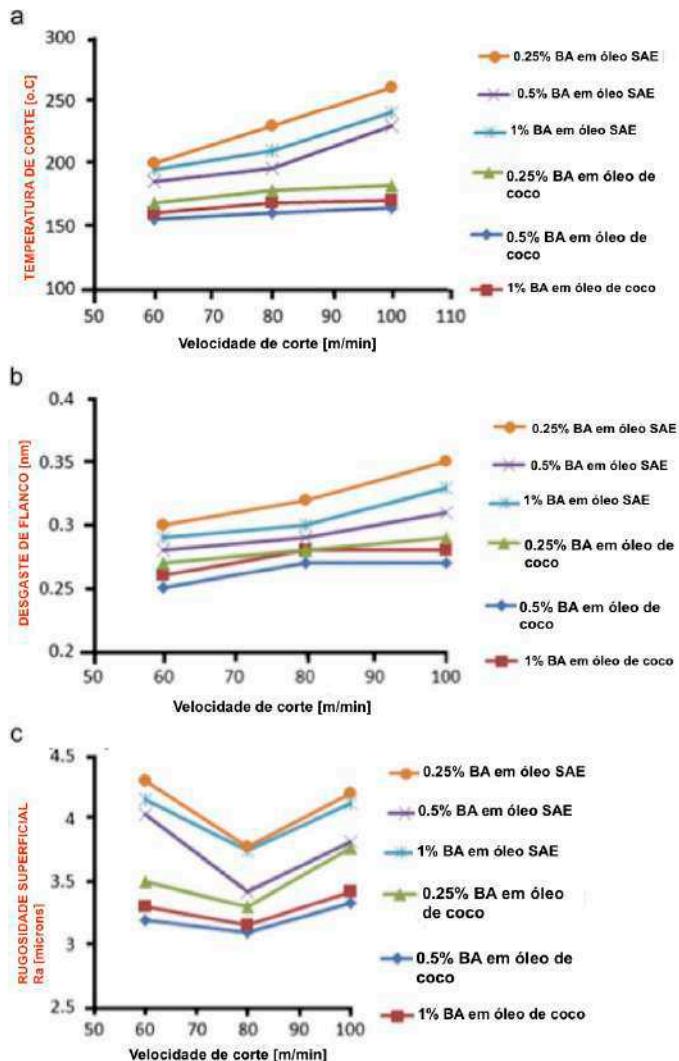


Figura 2.4. (a) Variação da temperatura com a velocidade de corte; (b) Variação do desgaste de flanco com a velocidade de corte; (c) Variação da rugosidade superficial com a velocidade de corte. Condições de corte: $f = 0,2 \text{ mm}/\text{rot}$; $a_p = 1\text{mm}$; tempo = 15min .
Fonte: Krishna et al. (2010)

Um fluido de corte com nanopartículas foi projetado e fabricado por com nanopartículas em um fluido de base vegetal biodegradável, para desenvolver a integração das tecnologias de processamento de materiais. Este novo produto possuía propriedades tribológicas superiores às dos fluidos de corte convencionais. A maior inovação é a habilidade de criar esses fluidos com nanopartículas pela modificação das superfícies das mesmas. As nanopartículas de nanotubos de MoS₂ foram usadas com sucesso como aditivo de baixo atrito. Krajnik et al. (2015) testaram esse produto, como prova de conceito e validação da tecnologia, e o

ensaio experimental foram realizados em três níveis para quantificar o comportamento tribológico do fluido com nanopartículas. Os experimentos incluíram ensaios tribológicos padronizados, testes de mapeamento para simular a usinagem, e ensaios de usinagem. Os autores demonstraram que as propriedades específicas das nanopartículas, o projeto do fluido e sua composição, bem como os mecanismos de lubrificação específica, apresentaram desempenho superior em termos de atrito e desgaste. O objetivo dos autores foi demonstrar como os recentes desenvolvimentos na nanotecnologia são inovações necessárias para a transição para a produção sustentável através do desenvolvimento de novos produtos e aplicações industriais integradas.

Como é possível observar, são várias pesquisas ao redor do mundo que comprovam melhores resultados encontrados com a utilização de fluidos de corte de base vegetal. Dentre os mais usados comercialmente estão os fluidos com base em óleo de soja, de canola, de coco, de mamona, entre outros. E cada vez mais pesquisas têm sido realizadas a fim de encontrar alternativas aos óleos com base de petróleo, que comprovadamente tem um poder de poluição altíssimo, e tem sido alvo de grande preocupação de órgãos ambientais, das autoridades públicas, e, consequentemente, das indústrias, que procuram ajustar seus processos buscando atender, além do aspecto tecnológico e econômico, o aspecto ambiental.

2.1.6. Manutenção e Problemas Causados pelos Fluidos de Corte

Fluidos de corte devem receber cuidados com manutenção tanto quanto as máquinas, equipamentos elétricos e instalações industriais. Os sistemas de refrigeração devem ser limpos a cada nova carga de fluido de corte. A remoção da camada sobrenadante, que se forma nos óleos que estão estocados (na máquina), é muito importante, pois impede a proliferação de bactérias anaeróbias, que são responsáveis pelo mau cheiro característico de emulsões contaminadas. A remoção dos cavacos também é importante, pois impede a formação de pontos de estagnação no reservatório, o que contribuiria para a proliferação de microrganismos. Deve-se ainda evitar a mistura de fluidos de procedências diferentes, pela possível ocorrência de incompatibilidade entre eles (BIANCHI,

AGUIAR e PIUBELI, 2003; FINZI, 2015; MEYER , REDETZKY e BRINKSMEIER , 2017).

Segundo este mesmo autor, procedimentos referentes a controle de pH, concentração e proliferação de micro-organismos devem ser feitos de maneira periódica. Em caso de infecções por bactérias, procedimentos padrões de limpeza devem ser tomados antes, durante e depois da colocação de nova carga de fluido de corte, através do uso de biocidas e produtos de limpeza adequados, que podem ser indicados pelo fabricante do fluido de corte.

2.1.7. Presença e Controle de Microrganismos

Segundo Passman (1988), existem fungos e bactérias que proliferam nos fluidos de corte e essas bactérias podem ser aeróbicas (sobrevivem apenas na presença de oxigênio), anaeróbicas facultativas (não precisam do oxigênio, pois realizam processo de fermentação) e as que não suportam oxigênio, as anaeróbicas. A presença de componentes orgânicos e sais minerais na formulação do fluido são fontes de nutrientes para esses micro-organismos se desenvolverem. A temperatura e pH dos sistemas de fluido também são aspectos fundamentais a serem analisados para o desenvolvimento de micro-organismos, pois temperaturas ambientes e/ou mais elevadas (caso da máquina ligada a muito tempo) e pH em torno de 9 favorecem o crescimento microbiano (PASSMAN, 1988).

Além disso, segundo Finzi (2015), a água usada para a diluição do fluido de corte é a fonte mais possível de contaminação microbiológica, mas a própria máquina-ferramenta também pode ser uma retroalimentadora de microrganismos para o fluido de corte, através de fluido residual, que normalmente permanece na máquina após a limpeza, ou através de biofilmes, o que leva a uma contaminação rápida do sistema. Entretanto, os microrganismos contaminantes do fluido de corte podem ser provenientes das peças de trabalho, das mãos dos operadores e até mesmo do próprio ambiente, através dos aerossóis (MQL) e da poeira suspensa (FINZI, 2015; MEYER , REDETZKY e BRINKSMEIER , 2017).

A contaminação do fluido pode ser evidenciada pela mudança no odor, decréscimo no pH, diminuição da vida útil da ferramenta, corrosão, incidência de irritação cutânea e instabilidade da emulsão, sendo geralmente ocasionadas pela

presença de fungos e bactérias. Esses microrganismos podem ter origem de diversas fontes como solo, água, de pessoas que manipulam a máquina (trato respiratório, digestório, pele), do ar, dentre outros.

De acordo com Passman (1988), a presença de microrganismos nos fluidos de corte é influenciada pela origem da energia, ou seja, é obtida por fotossíntese ou pela quebra de moléculas orgânicas. Os componentes orgânicos (óleo mineral, ésteres sintéticos, aminas), inorgânicos (cloro, sódio, magnésio, ferro, sulfato, cloreto, fosfato), a temperatura e o pH também influenciam na taxa de crescimento bacteriano (PASSMAN, 1988; KOCH , PASSMAN e RABENSTEIN , 2015). As principais bactérias presentes nos fluidos de corte são classificadas em dois grandes grupos: gram-positivas e gram-negativas, e podem ser identificadas após procedimento de coloração de Gram (TORTORA, FUNKE e CASE, 2012), como mostradas na figura 2.5.

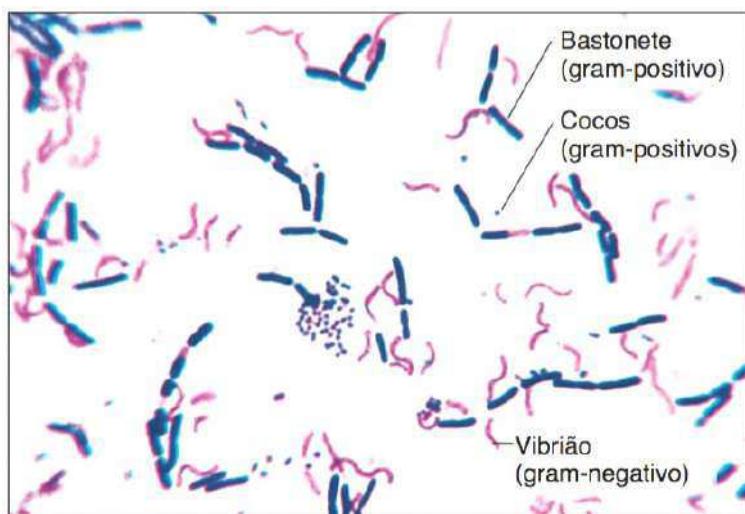


Figura 2.5. Micrografia de bactérias coradas pelo Gram. Os bastonetes e os cocos (roxo) são gram-positivos, e os vibriões (rosa) são gram-negativos. Fonte: (TORTORA, FUNKE e CASE, 2012)

Os fluidos de corte não contêm os mesmos componentes e nem apresentam os mesmos tipos de microrganismos e alguns exemplos comuns da variedade de microrganismos são: *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteus mirabilis*, *Enterobacter cloacae*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Desulfovibrio* spp. Essas bactérias podem transmitir algumas doenças aos trabalhadores, sendo mais comuns as

doenças respiratórias provocadas pelo contato com a solução, irritações na pele e câncer (Guia dos trabalhadores, 1999). Outros problemas comuns associados aos fluidos de corte são as dermatites e acnes, que acontecem quando há contato entre a pele e o fluido. Essas são as chamadas dermatites de contato. Outras formas de dermatites, as alérgicas, podem ocorrer mesmo quando não há contato com o fluido (PASSMAN e ROSSMOORE, 2002; IOWA WASTE REDUCTION CENTER, 2003).

Segundo Bennet (1983), a presença de microorganismos do trato respiratório demonstra que o sistema foi contaminado por humanos. Este fato está diretamente relacionado com a falta de higiene pessoal dos trabalhadores que manuseiam o fluido e as principais bactérias normalmente encontradas em fluidos e que estão relacionadas ao trato respiratório são: *Diplococcus* sp, *Klebsiella* sp, *Staphylococcus* sp, *Streptococcus* sp. Ainda segundo o autor, microrganismos patogênicos não devem ser preocupantes, pois sobrevivem pouco tempo no fluido pelo fato de organismos como *Pseudomonas* produzirem substâncias que deterioram esses patógenos. Encontrar *Staphylococcus* sp e *Streptococcus* sp é provavelmente resultado de doença de pele dos trabalhadores que manuseiam o fluido (BENNET, 1983).

Para Bennet (1972) ter organismos intestinais no fluido pode ser também um indicativo da precária higiene pessoal dos operadores de máquina, ou ainda presença de insetos ou animais que estejam próximos à máquina e que podem, accidentalmente, cair no reservatório. Organismos aquáticos também podem entrar em contato com o fluido do reservatório através da água usada para diluir o óleo concentrado, que se estiver contaminada, acaba por contaminar o óleo. Microrganismos provenientes da água, como *Sarcina* sp, *Aerobacter* sp, *Alcaligenes* sp, *Desulfovibrio* sp, *Flavobacterum* sp, *Pseudomonas* sp e *Vibrio* sp, e os micro-organismos provenientes de substâncias sólidas como *Achromobacter* sp, *Bacillus* sp, *Clostridium* sp, *Paracolobactrum* sp, *Pseudomonas* sp, *Sarcina* sp são comumente encontrados em fluidos de corte (BENNET, 1972).

Segundo Trabulsi *et al.* (1999), os fungos são microrganismos eucarióticos presentes no solo, na água, em alimentos, nos vegetais, em detritos em geral, em animais e no homem, sendo a maior parte aeróbicos obrigatórios e tolerando um pH em torno de 1,5 a 11. Alguns dos fungos filamentosos que mais se proliferam no fluido de corte são: *Fusarium* sp, que são microrganismos ubíquos, vivendo

normalmente como saprófitos no solo, água e em numerosas plantas, podendo nesse último grupo, ser considerado um fitopatógeno e *Cephalosporium* sp, que produzem substâncias antimicrobianas. A circulação dos fluidos de corte pode ser interrompida pela proliferação de certos fungos resistentes aos biocidas, devido à perda de compostos do fluido através da filtragem e dos cavacos (TRABULSI *et al.*, 2008; ROSSMOORE, 1993; RAO, SATYANARAYANA e VENKATASUBBAIAH, 2011).

A contaminação do fluido é um dos problemas que acomete a indústria, por isso, várias pesquisas têm sido feitas com a finalidade de encontrar novos métodos de controle do crescimento microbiano buscando substituir o procedimento tradicional, que é o uso de biocidas. O tratamento com biocidas causa uma falsa segurança, pois inibe o crescimento de algumas bactérias e proporciona uma seleção de espécies resistentes; além disso, alguns dos seus compostos são irritantes aos operários (IOWA WASTE REDUCTION CENTER, 2003; TRAFNY, *et al.*, 2015).

As principais consequências do ataque bacteriano nas emulsões, segundo Runge e Duarte (1990) são: redução do pH como resultado dos produtos metabólicos, maus odores causados pelos gases produzidos por bactérias anaeróbicas, instabilidade da viscosidade devido ao consumo dos emulgadores da emulsão e principalmente a corrosão das peças. Estes fatores representam grandes prejuízos e mostram a importância da necessidade de controle microbiológico dos procedimentos de usinagem. Além disso, a exposição à névoa formada quando a máquina está em funcionamento causa sérias doenças aos trabalhadores que após inalarem essas endotoxinas reagem alergicamente, originando enfermidades como hipersensibilidade, sintomas respiratórios semelhantes à asma e o contato com o fluido ocasiona irritações cutâneas, como dermatites e micoses (RUNGE, 1990; MURAT, 2012).

Dois efeitos causados pelo crescimento microbiano devem ser considerados em relação ao desempenho dos fluidos de corte: a formação de biofilmes no sistema e o metabolismo de seus componentes. Na figura 2.6, do trabalho de Meyer (2011), estão alguns exemplos de efeitos observados durante a vida útil de um fluido de corte. Com o aumento da carga microbiana (unidades formadoras de colônias por mililitro de fluido de corte – UFC/mL), a concentração de um aditivo selecionado

(monoetanolamina – MEA) cai. Além disso, o desempenho técnico (desgaste da ferramenta de corte) diminui. Outros estudos revelam um risco crescente de danos a pele e o desenvolvimento de infecções induzidas por esses microrganismos nos operadores (MURAT, 2012; FINZI, 2015).

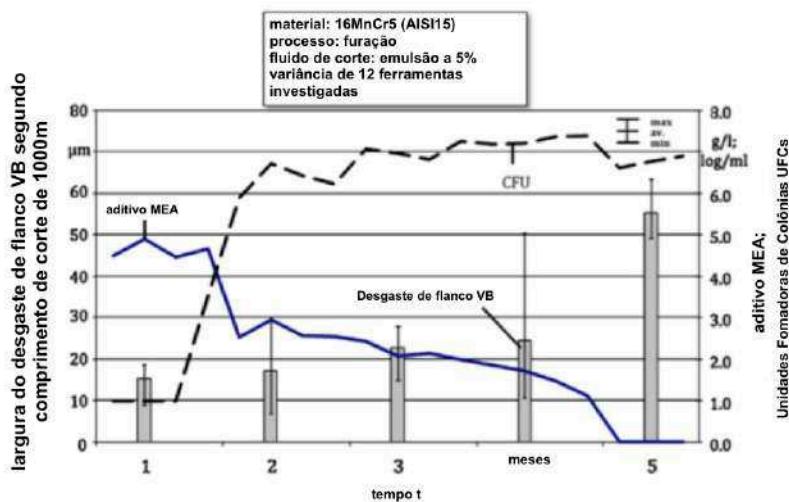


Figura 2.6. Influência da carga microbiana na qualidade técnica de fluidos de corte e desgaste da ferramenta na furação (Meyer, 2011)

No trabalho realizado por Grub (2013), fluidos de corte de base mineral e vegetal foram contaminados para verificar a influência dessa contaminação no desempenho mecânico dos mesmos. Ficou evidenciado que os índices de usinabilidade (força de corte, acabamento superficial e vida da ferramenta) apresentaram uma pequena diferença quando os ensaios foram feitos usando uma velocidade de corte mais baixa. Isso significa que a biodegradação dos fluidos de corte pode ter alterado suas propriedades lubrificantes, e o efeito foi mais evidenciado no fluido de corte de base vegetal. Da mesma forma, como não houve diferença significativa dos índices de usinabilidade nos ensaios realizados a velocidades de corte mais baixas, concluiu-se que as propriedades de refrigeração não foram alteradas pela biodegradação. O autor também verificou um decréscimo nos valores do pH dos fluidos investigados, sendo que a maior alteração foi encontrada no fluido de corte de base vegetal. O mau cheiro e o entupimento dos filtros da bomba foi observado também, e foi causado pela desestabilização das emulsões, principalmente a de base vegetal.



Figura 2.7. Fluido de corte contaminado no reservatório da máquina. Fonte: (GRUB, 2013)

A taxa de crescimento bacteriano aumenta com o aumento da temperatura até certo ponto. A pasteurização inativa a maioria dos patógenos comuns, mas outros métodos são necessários para matar os contaminantes dos fluidos de corte, como o uso de fluidos biorresistentes, que geralmente possuem reduzidas porcentagens de água e altas concentrações de agentes bactericidas e fungicidas. Rossmoore (1993) propôs utilizar fluidos que trabalhem com pH maior que 8,5 para diminuir a concentração de nutrientes, além de manter as reservas suficientes de substâncias emulsificantes para evitar a degradação prematura da emulsão durante o seu aproveitamento.

Para conter a degradação do fluido e garantir um aumento de sua vida útil, são acrescentados aditivos na preparação da emulsão, como biocidas, antiespumantes e anticorrosivos. O uso de biocidas é um meio tradicional de controle microbiano, mas vale ressaltar a importância de se controlar os efeitos colaterais causados por estes produtos à saúde e ao meio ambiente. Essas substâncias causam uma pequena perda na quantidade de óleo e criam uma falsa sensação de segurança, já que alguns pesquisadores constataram o desenvolvimento de micobactérias mesmo após o uso de biocidas. Thomé *et al.* (2007) constataram o crescimento de fungos do gênero *Penicillium sp*, em algumas amostras, porém não foi verificada a presença de bactérias do gênero das micobactérias, mas de bactérias gram-negativas, o que se explica pelo fato de espécimes diferentes de bactérias competirem pelo mesmo substrato, inibindo de

certa forma, o desenvolvimento de outros espécimes. Conforme a população fúngica e bacteriana cresce, o fluido perde a sua qualidade em desempenhar as funções de lubrificação e refrigeração, além de ser apontado como responsável pelo surgimento de problemas à saúde dos operadores, como a hipersensibilidade pulmonar, que é causada pelas micobactérias e suas endotoxinas (ROSSMOORE, 1993).

Existem evidências de que a diminuição da temperatura pode melhorar o acabamento nas operações de usinagem. Um estudo realizado por Besse (2006) mostrou que a redução da temperatura do fluido melhorou o revestimento de superfície da peça, sem afetar de forma significativa as características dos fluidos de corte e ainda diminui a proliferação de microrganismos uma vez que sua capacidade enzimática é reduzida a baixas temperaturas e se tornam inativos por não estarem na temperatura ideal para seu metabolismo. Pesquisadores da UNESP em Bauru/SP (ARRUDA *et al.*, 2007) solicitaram patente de um dispositivo para controle da contaminação microbiana dos fluidos de corte com utilização de baixa temperatura, com base em experimentos realizados em laboratório. Esse dispositivo contém uma serpentina de cobre, imersa em gelo e isolada termicamente do ambiente externo, por onde passa o fluido imediatamente após ser utilizado no corte, que é resfriado durante sua passagem pelo sistema e depois é retornado ao reservatório da máquina de usinagem, que também está isolado termicamente do ambiente. Os pesquisadores tiveram resultados satisfatórios no que diz respeito à diminuição do crescimento e proliferação bacteriana, que diminuem consideravelmente em temperaturas próximas de 7°C (BIANCHI, *et al.*, 2009). Para conter os micro-organismos, também foram realizados testes com radiação de Cobalto 60 e aplicação de Ozônio, mas não encontraram uma grande aceitação nas indústrias por causarem riscos à saúde e pelos altos custos de instalação (HOWES, THÖNSHOFF e HEUER, 1991).

Problemas respiratórios também acontecem em pessoas expostas a partículas ou vapores de fluidos de corte. Sabe-se que sistemas convencionais de aplicação dos fluidos de corte emitem partículas suspensas no ambiente, mas os novos métodos de aplicação, denominados MQL (Mínima Quantidade de Fluido) e Alta Pressão, são potencialmente mais emissores de partículas suspensas na atmosfera. Os sintomas mais frequentes quando em exposição nestes ambientes são dor de garganta, olhos vermelhos e lacrimejantes, coriza nasal, sangramentos

nasais, tosse, chiado no pulmão, perda de fôlego, entre outros sintomas parecidos com os de uma gripe ou resfriado. Pessoas com maior sensibilidade podem apresentar asma, bronquite crônica e pneumonia. Outros fatores, como o fumo, por exemplo, podem agravar esses sintomas, levando a doenças ainda mais graves (IOWA WASTE REDUCTION CENTER, 2003; KOCH , PASSMAN e RABENSTEIN , 2015).

Conforme são liberados restos metabólicos dos microrganismos no meio, ocorre corrosão de toda a maquinaria em contato com o fluido contaminado. Assim, o fluido sofre uma redução drástica de sua vida útil, já que essa degradação ocorre de forma acelerada. Junto a essa perda de fluido e possível danificação das peças em contato com ele, os microrganismos também são associados ao aparecimento de reações alérgicas nos operários expostos ao aerossol do fluido (THOMÉ *et al.*, 2007; FINZI, 2015).

Embora o crescimento de microrganismos nos fluidos de corte seja um grave problema, não há no mercado um tratamento completamente eficaz contra a contaminação, e estudos que visem à caracterização da flora que contamina os fluidos e causam doenças nos expostos a eles devem ser conduzidos. Assim, devem-se envidar esforços com pesquisas para se chegar a tratamentos eficazes para o problema. Uma das possibilidades desses tratamentos é um sistema de desinfecção com radiação ultravioleta, proposto por Bianchi *et al.* (2008), pesquisadores do Laboratório de Usinagem por Abrasão da UNESP, em Bauru. Os raios UV penetram na parede celular dos micro-organismos presentes no fluido de corte, e atingem o núcleo, onde estão as informações genéticas. Essa absorção provoca um rearranjo na cadeia de DNA, interferindo na capacidade de reprodução desses seres, o que os torna inativos. A vantagem desse sistema é atingir tanto bactérias como fungos, enquanto que os biocidas usados como aditivos em alguns fluidos atingem apenas as bactérias (BIANCHI, *et al.*, 2008).

2.1.8. Impactos Ambientais e Legislação

A utilização de fluidos de corte faz da indústria metal-mecânica uma grande agressora do meio ambiente. Apesar de trazer vários benefícios à indústria metalúrgica, como a diminuição dos desgastes das ferramentas e a consequente

redução no custo da produção, os fluidos de corte podem trazer grandes riscos à saúde os trabalhadores e impactos negativos no ambiente, principalmente relacionados com o seu descarte (GRUB, 2013; FINZI, 2015).

Citando Ignácio (1998), “Nas últimas décadas, o consumo de recursos naturais, a poluição do ar e os resíduos industriais vêm despertando uma grande preocupação dos órgãos ambientais e das autoridades públicas, no sentido de viabilizar a harmonia entre as atividades industriais e o meio ambiente. Por sua vez, as indústrias pressionadas pela competitividade, globalização da economia e legislação ambiental procuram ajustar seus processos buscando atender concomitantemente a três aspectos importantes para a sua sobrevivência: o tecnológico, o econômico e o ecológico. Na indústria metal-mecânica, onde o processo de utilização de fluidos de corte na fabricação tem sido sistemático e cientificamente avaliado desde o início desse século, a preocupação com a questão ambiental não é menor que em outros setores da economia, haja vista a evolução das normas ambientais pertinentes aos efluentes líquidos que tratam particularmente dos fluidos de corte”.

A Legislação Ambiental Brasileira apresenta algumas determinações poluição e determina punições aos poluidores. A Lei 6.938/81, Lei da Política Nacional do Meio Ambiente, que completou 35 anos em 2016, é a lei ambiental mais importante e define que o poluidor é obrigado a indenizar danos ambientais que causar, independente da culpa. O Ministério Público pode propor ações de responsabilidade civil por danos ao meio ambiente, impondo ao poluidor a obrigação de recuperar e/ou indenizar prejuízos causados. Essa lei criou a obrigatoriedade dos estudos e respectivos relatórios de Impacto Ambiental (EIA-RIMA). A Lei de Crimes Ambientais, Lei 9.605/98, diz respeito a infrações e punições. A pessoa jurídica, autora ou coautora da infração ambiental, pode ser penalizada, chegando à liquidação da empresa, se ela tiver sido criada ou usada para facilitar ou ocultar um crime ambiental. A punição pode ser extinta caso se comprove a recuperação do dano ambiental. As multas variam de R\$50,00 a R\$50 milhões.

Existem vários instrumentos e mecanismos de monitoramento da poluição, em uso pelos órgãos governamentais federais, estaduais e municipais, e tem sido muito úteis na detecção de transgressões ambientais. A lei 9.996/2000, por exemplo, dispõe sobre prevenção, o controle e a fiscalização da poluição causada por

lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional e dá outras providências. Prevê penas para poluições causadas principalmente por resíduos tóxicos lançados em águas marítimas, como resíduos de lavagens de tanques industriais, óleos de navios e plataformas, esgoto com resíduos tóxicos, entre outros.

O decreto 50.877/61 e seus respectivos artigos dispõem sobre o lançamento de resíduos tóxicos e oleosos em águas interiores e litorâneas do país. Entre outros artigos, o 1º trata das condições de lançamento de resíduos líquidos, sólidos ou gasosos industriais, o que só poderá ocorrer in natura ou após serem tratados. Este decreto ainda dispõe sobre os padrões de qualidade da água para o interesse industrial, onde é determinado que a média mensal de oxigênio dissolvido em água não pode ser inferior a 4 (quatro) partes por milhão, nem a média diária inferior a 3 (três) partes por milhão. A média mensal de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) não deve ser superior a 5 partes por milhão de água (5 dias / 20°C) e o pH não será inferior a 5 e nem superior a 9 ½ (nove e meio). Quaisquer alterações nos padrões anteriores terão que passar por autorização das autoridades pertinentes.

A Resolução Conama no. 362/2005, alterada pela Resolução 450/2012, dispõe sobre o recolhimento, coleta e destinação final de óleo lubrificante, usado ou contaminado. Em seu artigo 3º, diz que “todo o óleo lubrificante usado ou contaminado coletado deverá ser destinado à reciclagem por meio do processo de rerrefino”, exceto em situações que for comprovada a inviabilidade desse processo, sendo então necessário licenciamento ambiental para outro destino. Essa reciclagem deverá ser feita por outro processo tecnológico, desde que seja comprovada a sua eficácia ambiental, a critério do órgão ambiental competente. Sendo inviável a sua reciclagem, qualquer outra utilização do óleo usado ou contaminado dependerá do licenciamento ambiental. No seu artigo 4º, diz que “Os óleos lubrificantes utilizados no Brasil devem observar, obrigatoriamente, o princípio da reciclagem”, sendo que o produtor, o importador e o revendedor de óleo lubrificante acabado, bem como o gerador de óleo lubrificante usado, são responsáveis pelo recolhimento do óleo lubrificante usado ou contaminado. A resolução também proíbe o descarte desses óleos usados ou contaminados em solos, subsolos, águas interiores, mar territorial e nos sistemas de esgoto (artigo 12º), e não considera a incineração ou combustão dos mesmos como forma de

reciclagem ou destinação adequada (artigo 13º). A fiscalização cumprimento das obrigações e aplicação das sanções cabíveis é de responsabilidade do IBAMA e dos órgãos estadual e municipal de meio ambiente. Esta resolução foi feita pensando-se mais em contaminações ambientais produzidas por resíduos de óleos lubrificantes em geral de base mineral, derivados de petróleo, mas aplica-se também às indústrias que produzem e utilizam tanto óleos de base mineral como os de base vegetal na sua forma emulsionada. Excluem-se aqui as soluções (artigo 10º alínea VII).

Portanto, as empresas que utilizam os fluidos de corte devem estar sempre atentas a todas as medidas que devem adotar para o correto manejo e descarte dos fluidos usados e seus resíduos. Na maioria das vezes, por falta de informações técnicas e desconhecimento da legislação, seguem práticas incorretas na destinação dos fluidos de corte usados, como por exemplo, armazenagem inadequada, transporte impróprio, entrega a receptores não autorizados e disposição de resíduos em locais não autorizados. Na maioria das vezes, os fluidos de corte emulsionáveis e sintéticos (soluções) devem primeiro passar por um tratamento de quebra e separação dos componentes antes de serem descartados ou reaproveitados, diferente dos óleos integrais, que podem ser vendidos ou tratados dentro da própria empresa através de processos como: filtração, sedimentação, flotação, floculação, separação magnética, centrifugação, decantação. Existem estudo sobre a viabilidade dessa reutilização dos fluidos de corte que demonstram resultados promissores (SOUZA, GOMES e SOUZA, 2012).

2.2. DESGASTE E MECANISMOS DE DESGASTES DAS FERRAMENTAS DE CORTE

As ferramentas de corte estão sujeitas a um processo de destruição que tornará necessária a sua substituição, independente da sua dureza ou resistência ao desgaste. Três tipos de destruição podem acontecer:

- **Avaria**, que é a destruição repentina e inesperada da ferramenta, causada pela quebra, lasca ou trinca da mesma;

- **Desgaste**, que é a mudança na forma original da ferramenta durante o corte, causado pela perda gradual de material por algum processo ou mecanismo, definição dada pela Norma ISO 3685 (1993). Ao contrário da avaria, a perda de material acontece de maneira contínua e progressiva, e em proporções pequenas;
- **Deformação Plástica**, que é a mudança de forma da ferramenta por causa do deslocamento de massa devido ao carregamento excessivo sofrido pela mesma. Alguns autores consideram a deformação plástica como um mecanismo de desgaste (TRENT e WRIGHT, 2000; MACHADO, et al., 2015; NORMA ISO 3685, 1993)

Citando Machado et al. (2015), “em um processo de usinagem existem duas causas fortes para a substituição da ferramenta: a ocorrência de uma avaria, comuns nos cortes interrompidos (fresamento) devido aos choques mecânicos e térmicos inerentes a esses processos, ou o alcance de grandes proporções do desgaste ou da deformação plástica, que comprometem a usinagem dentro das especificações de projeto”.

Pelo menos três formas de desgaste podem ser identificadas nas ferramentas de corte, tanto na superfície de saída como na superfície de folga, e estas formas estão mostradas na figura 2.8:

- Desgaste de cratera – área A – ocorre na superfície de saída;
- Desgaste de flanco – área B – ocorre na superfície de folga;
- Desgaste de entalhe – áreas C e D – ocorre na superfície de folga, mas pode se estender para a superfície de saída.

Antes que alguma dessas formas de desgaste alcance maiores proporções e comprometa o processo de usinagem, a ferramenta deverá ser substituída. A figura 2.9 mostra alguns dos parâmetros utilizados pela norma ISO 3685 (1993) para quantificar esses desgastes. Os principais desgastes são:

- Profundidade de cratera (KT);
- Desgaste de flanco médio (VB_B);
- Desgaste de flanco máximo (VB_{max});
- Desgaste de entalhe (VB_N).

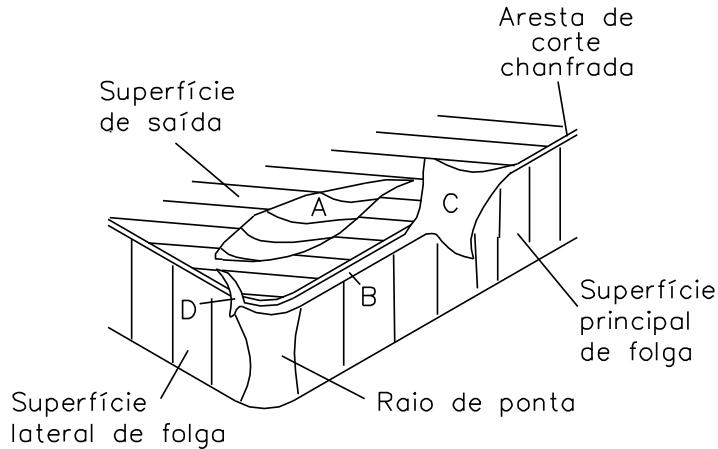


Figura 2.8. Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (Fonte: Machado *et al.*, 2015).

O critério recomendado pela ISO 3685 (1993) para ferramentas de aço rápido, metal duro e cerâmicas é:

- Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3 \text{ mm}$;
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{Bmax} = 0,6 \text{ mm}$;
- Profundidade da cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$ onde f é avanço em mm/rev ;
- Desgaste de entalhe, VB_N e $VC_N = 1 \text{ mm}$
- Falha catastrófica.

O ideal é que seja feita a reafiação ou a substituição da ferramenta de corte quando qualquer desses limites seja ultrapassado.

Deve-se dizer que os valores sugeridos pela ISO Standard 3685 (1993) são para testes de vida de ferramentas, e industrialmente esses parâmetros podem assumir valores diferentes, pois eles dependem de vários fatores tais como: rigidez da máquina-ferramenta, precisão requerida na peça, etc., que são diferentes para os diversos processos de fabricação. Uma maneira prática muito utilizada industrialmente é permanecer usando a aresta de corte até que as peças produzidas saiam das especificações de tolerância e/ou acabamento de projeto. Sistemas modernos de usinagem utilizam hoje em dia o controle automático do desgaste,

indiretamente por meio de monitoramento das componentes de forças, potência ou vibrações do sistema ou diretamente por emissão acústica” (DA SILVA, 2002).

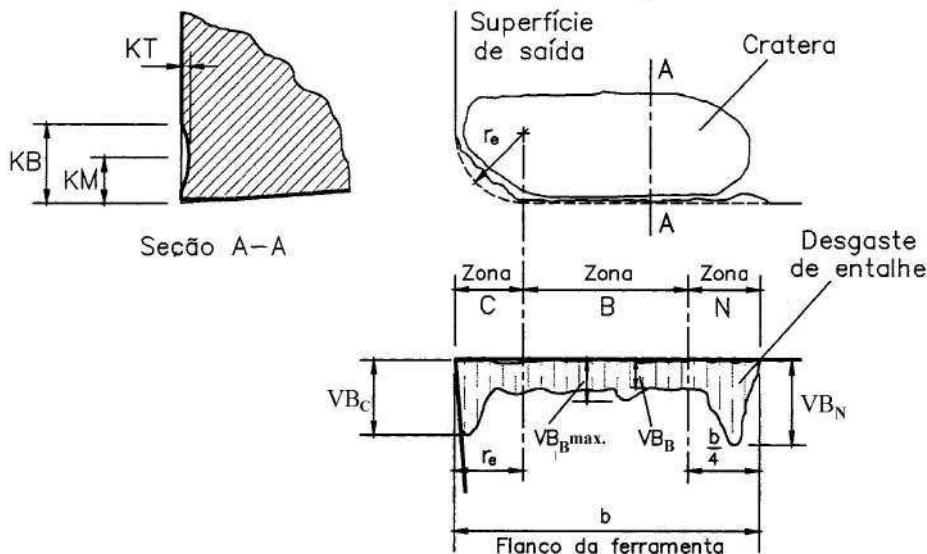


Figura 2.9. Parâmetros Utilizados para Medir os Desgastes das Ferramentas de Corte (Fonte: Norma ISO 3685, 1993).

Normalmente as arestas de corte se desgastam seguindo uma curva padrão, mostrada na figura 2.10, onde se destacam três estágios de evolução (MACHADO, et al., 2015).

- **Estágio I:** ocorre nos primeiros instantes de corte, quando o desgaste apresenta uma taxa decrescente, e a ferramenta de corte sofre um desgaste acelerado. A taxa de desgaste vai ficando cada vez menor com o passar do tempo, até que a primeira inflexão no final desse estágio é observada.
- **Estágio II:** o desgaste apresenta uma taxa de desgaste quase constante ao longo do tempo, e a ferramenta já se encontra totalmente adequada ao processo.
- **Estágio III:** nesse estágio ocorre uma aceleração no desgaste, aumentando acentuadamente a taxa, e promovendo a quebra da ferramenta em um curto espaço de tempo. De posse desse comportamento, é de responsabilidade dos engenheiros envolvidos no processo de usinagem que evitem que a ferramenta chegue ao estágio III, pois a quebra da ferramenta é imprevisível

nesse estágio, e as consequências de uma quebra de ferramenta em serviço podem custar muito caro.

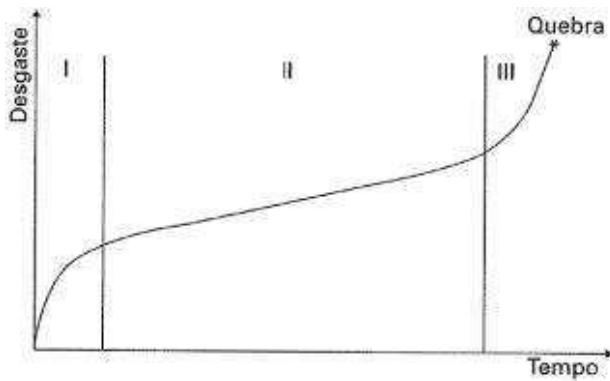


Figura 2.10. Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte em relação ao tempo. Fonte: (MACHADO, et al., 2015)

2.2.1. Mecanismos de Desgaste

Qualquer que seja condição de corte, normalmente todas as formas de desgaste estarão presentes, embora alguma delas prevaleça sobre as outras. Os mecanismos de desgaste dependem das condições e dos parâmetros de corte utilizados, e são eles: abrasão, adesão, difusão e oxidação. O diagrama da figura 2.11 apresenta esses mecanismos em função da temperatura de corte, ou qualquer parâmetro que a influencie, como a velocidade de corte. É possível observar que em temperaturas de usinagem mais baixas os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes, mas a adesão é predominante. Em temperaturas maiores a difusão e a oxidação substituem a adesão e a influência daquela fica maior quanto maior for a temperatura. Este diagrama também salienta que o desgaste total cresce muito com o aumento da temperatura de corte (MACHADO, et al., 2015).

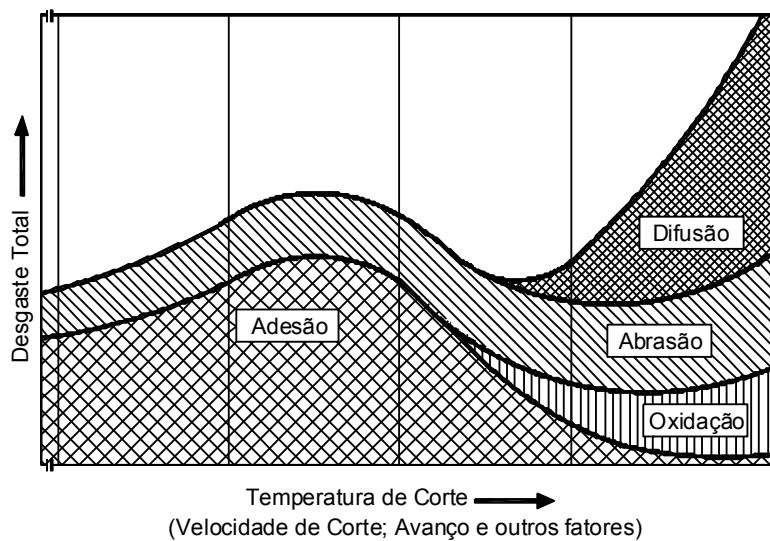


Figura 2.11. Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte (Fonte: König e Klocke, 1997; Machado *et al.*, 2015).

A literatura apresenta variações na classificação dos mecanismos de desgaste, porém, grande parte dos autores considera pelo menos seis diferentes mostrados na figura 2.12.

- (1) **Deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas:** não é propriamente um mecanismo de desgaste, mas um processo de destruição da ferramenta de corte. Ocorre mais provavelmente na usinagem de metais com alto poder de fusão, como ferramentas de aço rápido, onde as tensões cisalhantes na interface cavaco/ferramenta são suficientemente grandes para causar a deformação plástica na superfície de saída da ferramenta.
- (2) **Deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão:** é outro processo de destruição, que foi classificado de mecanismo por Trent e Wright (2000). Ocorre na usinagem de materiais de alta dureza com ferramentas de aço rápido ou metal duro, a altas velocidades de corte, o que leva a uma falha catastrófica.
- (3) **Difusão:** é um mecanismo que envolve a transferência de átomos de um material para o outro, e, portanto, depende da temperatura e da solubilidade dos elementos da zona de fluxo (afinidade química). A área desgastada, quando olhada ao microscópio, tem a aparência lisa. O desgaste difusivo pode atuar na superfície de saída e na superfície de folga da ferramenta, e a taxa de desgaste aumenta com a elevação da velocidade de corte e do avanço.

- (4) **Aderência e Arrastamento (Attrition):** é um mecanismo que ocorre a baixas velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. A aresta postiça de corte (APC) pode aparecer, e o contato com a ferramenta se torna menos contínuo, principalmente se ela for instável. Assim, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados com o fluxo de material. Este fenômeno ocorre na zona de escorregamento, e, ao microscópio, a superfície desgastada tem aparência áspera.

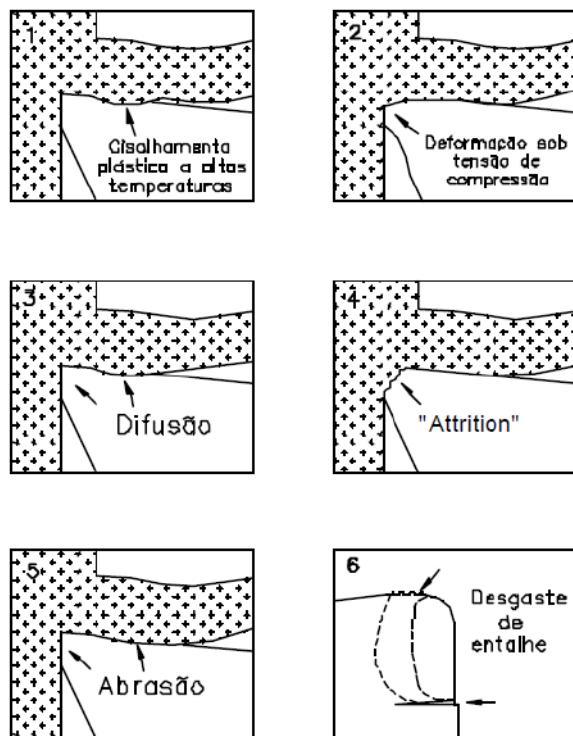


Figura 2.12. Mecanismos de desgaste que podem acontecer nas ferramentas de corte.

Fonte: Trent e Wright, 2000 citado por Machado *et al.*, 2015.

- (5) **Abrasão:** este mecanismo de desgaste acontece quando o material da superfície é removido ou deslocado da superfície por partículas duras que podem estar soltas entre duas superfícies com movimento relativo, ou que pertencem a uma das superfícies. É um mecanismo importante na usinagem com ferramentas de metal duro revestidas, cerâmicas puras e mistas. Olhando-se ao microscópio uma ferramenta que sofreu desgaste abrasivo, é possível notar sulcos paralelos entre si formados na direção do fluxo do material.

(6) **Desgaste de entalhe:** também não é propriamente um mecanismo, mas sim uma forma de desgaste, e aparece sempre nas regiões coincidentes com as laterais do cavaco, mas não há um consenso que explique exatamente o mecanismo que causa o desgaste de entalhe. Ocorre principalmente na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas e com elevado grau de encruamento, como ligas de titânio, níquel, cobalto e aços inoxidáveis. Em geral, nas regiões onde ocorre esse tipo de desgaste, as condições de escorregamento prevalecem, e o mecanismo de desgaste envolve, provavelmente, abrasão e *attrition*, fenômenos que são bastante influenciados pelas interações com a atmosfera (SANTOS e SALES, 2007; MACHADO, *et al.*, 2015; MARQUES, 2015; TALIB e RAHIM, 2016).

Apesar de ser uma área de estudo que exige experiência e muito trabalho microscópio, trata-se de uma atividade de extrema importância para o conhecimento e domínio da usinagem. O estudo detalhado destes mecanismos pode sugerir mudanças no processo para aumentar a produtividade e reduzir custos de fabricação de componentes usinados. Neste aspecto, análises em microscópios óticos e, principalmente, no microscópio eletrônico de varredura são fundamentais. Ampliações de 1000, 2000, 5000 ou maiores são importantes para colher informações relevantes das áreas desgastadas, para se concluir sobre a presença dos mecanismos de desgaste atuantes.

Vários pesquisadores encontraram resultados que mostram que a utilização de fluidos de corte proporcionam menores desgastes e melhoram a vida das ferramentas de corte. Ozcelik *et al.* (2011) pesquisaram o desempenho de fluidos de corte de base vegetal, um baseado em óleo refinado de canola e outro em óleo refinado de girassol, incluindo diferentes porcentagens de aditivos EP (extrema pressão), durante o torneamento de um aço inoxidável AISI 304L, comparando com o desempenho de dois fluidos comerciais de base mineral e com a usinagem a seco. Dentre os resultados, a condição a seco e os dois fluidos de corte de base mineral foram os que obtiveram os piores valores de vida da ferramenta, e o mecanismo de desgaste dominante foi o desgaste abrasivo. Dhar *et al.* (2007) também encontraram melhores resultados no que diz respeito ao desgaste das ferramentas quando

utilizaram fluido de corte na forma de MQL, comparando com a usinagem a seco (OZCELIK, et al., 2011; DHAR, AHMED e ISLAM, 2007).

No trabalho de Marques (2015), a liga Inconel 718 foi usinada (torneamento) com ferramentas de metal duro usando fluido de corte aplicado sob a forma de jorro e MQL, e observou-se que a aplicação em forma de jorro promoveu maiores vidas das ferramentas de corte, chegando a diferença a mais de 200%. Além disso, o desgaste de flanco foi o tipo de desgaste predominante, e os mecanismos de desgaste *attrition* e difusão foram os principais atuantes no sistema. Na usinagem de um aço inoxidável V304UF, Grub (2013) demonstrou que houve uma piora nos índices de usinabilidade do material quando da utilização de fluidos de corte contaminados em uma baixa velocidade de corte. O desgaste das ferramentas ficou aproximadamente 18% maior quando o fluido de corte vegetal contaminado foi utilizado na usinagem daquele material. Em um trabalho também voltado para a contaminação microbiológica do fluido, Finzi (2017) encontrou um resultado interessante, onde o desgaste das ferramentas de corte diminuiu quando da utilização de um fluido de corte de base mineral contaminado, comparando-se à utilização de um fluido de corte novo. Esse comportamento não foi observado na utilização de um fluido de corte de base vegetal contaminado, quando aconteceu justamente o contrário. A explicação para esse fenômeno pode ser pelo fato da contaminação microbiológica ter sido mais prejudicial às propriedades lubrificantes do fluido de corte de base vegetal do que às propriedades lubrificantes do fluido de corte de base mineral.

No estudo de Araújo Jr. et al (2017), o uso de óleos vegetais naturais biodegradáveis como fluidos de corte durante o fresamento de um aço 1045 usando a técnica de pulverização MQL. Os óleos (comestíveis) estudados foram os de semente de algodão, babaçu, canola, girassol, milho e soja e compararam com um óleo de base vegetal (comercial) LB 2000 e com a usinagem a seco. Os óleos comestíveis que apresentaram melhores resultados na refrigeração foram os de semente de algodão e o de canola, no que diz respeito à vida da ferramenta durante os ensaios de fresamento, se mostrando inclusive melhores do que o fluido de corte comercial (ARAÚJO JUNIOR et al., 2017; KOCH, PASSMAN e RABENSTEIN, 2015)

2.3. QUALIDADE SUPERFICIAL DAS PEÇAS USINADAS

Pode-se dizer que o objetivo principal das operações de usinagem é produzir componentes com o máximo de funcionalidade, a baixos custos e alta taxa de produção. Em outras palavras, isso significa que cada peça ou conjunto de um produto final deve ser feito de acordo com as especificações definidas quanto às dimensões, forma e acabamento da superfície. Entretanto, esse objetivo não é tão fácil de ser alcançado e podem ocorrer vários problemas porque muitas variáveis do processo produtivo são ainda pouco exploradas. Dentre elas se destacam as características e usinabilidade do material da peça, seleção correta do material da ferramenta e os parâmetros de corte para produzir as peças nas especificações de exigência de acabamento prevista pelo projeto. Por exemplo, peças para aplicações na indústria automobilística e aeronáutica possuem particularidades que tornam complexos o seu dimensionamento e fabricação, pois, já que devem apresentar altíssima confiabilidade, qualquer falha pode trazer consequências catastróficas. Por causa de falhas prematuras em componentes aeronáuticos, uma investigação sobre possíveis alterações nas características do material da peça durante a usinagem começou a ser feita, surgindo, assim, a linha de pesquisa conhecida como integridade superficial (SANTOS e SALES, 2007; MACHADO *et al.*, 2015).

Vários fatores influenciam na condição final de uma superfície usinada, entre eles deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e até reações químicas, causando efeitos diferentes na superfície formada. Dessa forma, o termo “integridade superficial” é usado para descrever a qualidade de uma superfície, portanto, engloba um grande número de alterações sofridas por ela, incluindo alterações superficiais (acabamento) e alterações subsuperficiais (alterações nas camadas internas da peça). O nível de conhecimento da integridade superficial depende de quão crítica é a sua aplicação, pois cada item avaliado contribui para a elevação do custo final da peça fabricada.

O acabamento de uma superfície é a combinação de vários fatores: rugosidade, ondulações e falhas, que podem ser vistos na figura 2.13. Ondulações consistem de irregularidades superficiais ou de erros geométricos cujos espaçamentos são maiores que as rugosidades. São causadas por vibrações e

flexões da ferramenta ou da peça, devido à força de usinagem, temperatura de corte ou a erros de fixação da peça ou da ferramenta.

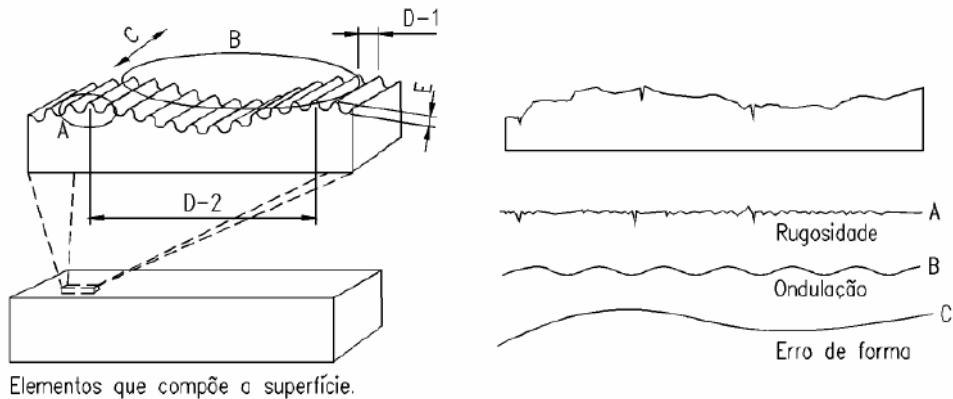


Figura 2.13. Elementos do acabamento superficial

Falhas são interrupções na topografia típica da superfície; são não intencionais, inesperadas e indesejáveis. A rugosidade é composta de irregularidades finas ou erros micro geométricos resultantes do processo de corte, como marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, entre outros, e pode ser usada como parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem.

Existe um grande número de parâmetros que delimitam a rugosidade de uma superfície, que são classificados em:

- Parâmetros de amplitude:* determinados pela altura dos picos e/ou profundidade dos vales, a partir de um referencial na horizontal.
- Parâmetros de espaçamento:* determinados pela distância entre as irregularidades ao longo da superfície.
- Parâmetros híbridos:* combinação entre os parâmetros de espaçamento e de amplitude.

De acordo com a norma ABNT ISO 4287 (2002) há diversos parâmetros empregados para a quantificação da rugosidade, entre eles R_a e R_q . A rugosidade média R_a é o parâmetro mais difundido na indústria, por ser aplicado à maioria dos processos de fabricação. É determinado pela média das distâncias entre os pontos da superfície e a linha de centro, ao longo do comprimento de amostragem, como mostrado na figura 2.14. Sua definição pela norma é a “média aritmética dos valores

absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m)” (SILVA NETO, 2012). Algumas aplicações de R_a são: controle contínuo da rugosidade na linha de produção, superfícies com sulcos de usinagem bem orientados (torneamento, fresamento, etc.), superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins apenas estéticos.

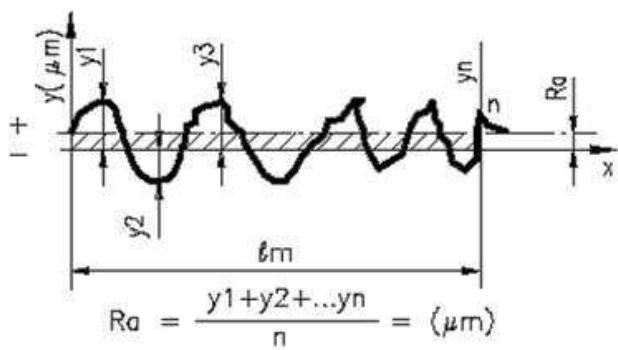


Figura 2.14. Rugosidade média R_a

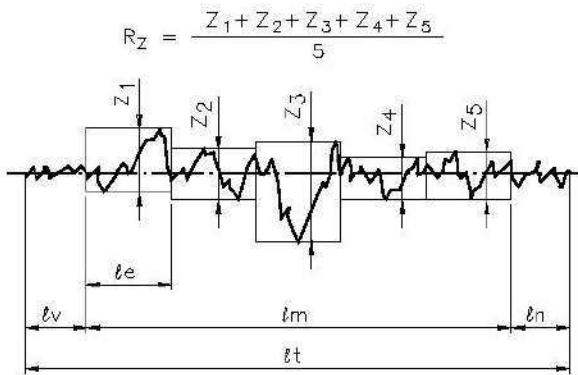
Algumas vantagens de R_a são: é o parâmetro mais utilizado, aplicável à maioria dos processos de fabricação, quase todos os equipamentos de medição apresentam esse parâmetro, riscos superficiais inerentes ao processo alteram pouco seu valor (superfícies em que o acabamento apresenta sulcos de usinagem bem orientados como torneamento e fresamento). O parâmetro também oferece algumas desvantagens como presença de um pico ou vale atípico oriundo do processo não é identificado e pode ocultar um defeito, seu valor não define a forma das irregularidades e pode ser associado a diferentes processos, não distingue picos de vales, para processos com frequência muito alta de vales ou picos (sinterização), não é adequado pois a distorção provocada pelo filtro ocasiona erros grandes.

A rugosidade média quadrática R_q é um parâmetro calculado segundo a equação 2.1. Este parâmetro representa melhor a natureza de uma superfície, pois acentua o efeito dos valores do perfil que se afastam da média. É um parâmetro bastante usado nos EUA.

$$R_q = \sqrt{\frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}{n}}$$

Equação 2.1

A rugosidade média R_z é a média aritmética dos cinco valores de rugosidades parciais Z_i . A rugosidade parcial Z_i é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem (*cut-off*). A representação gráfica do perfil de rugosidades está mostrada na figura 2.15.

Figura 2.15. Rugosidade média R_z

Algumas vantagens de R_z são: este parâmetro considera todo o comprimento de avaliação, informa sobre a máxima deterioração da superfície vertical da peça, é de fácil obtenção quando o equipamento de medição fornece o gráfico da superfície, tem grande aplicação na maioria dos países, fornece informações complementares ao R_a . Por outro lado, a avaliação pode levar a resultados enganosos, por exemplo, presença de vales profundos.

A rugosidade máxima R_y (figura 2.16) está definida como o maior valor das rugosidades parciais (Z_i) que se apresenta no percurso de medição l_m .

Pelo fato de conseguir mostrar a máxima deterioração da superfície e fornecer valores que na medição Ra são camuflados, é o parâmetro mais indicado para analisar as rugosidades nos seguintes casos,:

- Superfícies de vedação,
- Assentos de anéis de vedação,
- Superfícies dinamicamente carregadas,

- Tampões em geral,
- Parafusos altamente carregados,
- Superfícies de deslizamento em que o perfil efetivo é periódico.

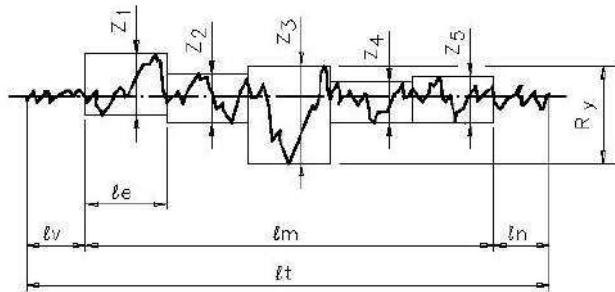


Figura 2.16. Rugosidade R_y definida pela rugosidade parcial, neste caso $R_y = Z_3$

A rugosidade total R_t corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e vale mais baixo no comprimento de avaliação l_m , independente dos valores de rugosidade parcial (Z_i), como mostrado na figura 2.17.

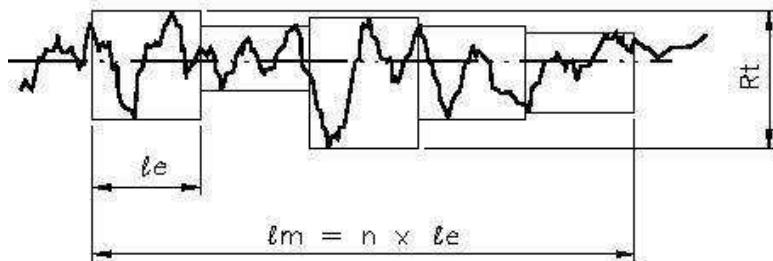


Figura 2.17. Rugosidade total R_t

A rugosidade sofre influência de vários parâmetros de usinagem, incluindo a geometria da ferramenta de corte, a geometria da peça, a rigidez da máquina-ferramenta, o material da peça, as condições de corte e o material da ferramenta. Segundo Machado et al (2015), no geral, a rugosidade é menor, ou o acabamento é melhor, quando:

- As flexões geradas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas;
- A ponta da ferramenta possui raio de arredondamento;
- A ferramenta e a peça estão corretamente posicionadas e centradas, evitando desvios;

- O material da peça é livre de defeitos como trincas e bolhas;
- O eixo principal da máquina ferramenta está corretamente alinhado e as guias estão sem desgastes;
- A aresta de corte está sem desgastes ou quebras;
- O corte ocorre sem aresta postiça de corte (APC).

As condições de corte têm grande influência sobre a rugosidade, sendo o avanço (f) o parâmetro mais influente. Isto significa que a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática ao avanço. Sob baixas velocidades ocorre a formação da APC, e o aumento no avanço nessas condições resulta em um acabamento muito pior. O aumento da profundidade de corte (a_p) aumenta os valores das forças, e, portanto, a possibilidade de flexões, o que faz com que as alturas das ondulações também aumente. A geometria da ferramenta, principalmente o raio de ponta (r_e), que deve ser pelo menos o dobro do valor do avanço para diminuir o efeito das marcas de avanço, o que proporciona uma melhoria na rugosidade.

A utilização de fluido de corte reduz o desgaste da ferramenta e o atrito entre a ferramenta e a peça ou o cavaco, contribuindo também para uma melhoria do acabamento superficial. Porém, fluidos com capacidades mais refrigerantes que lubrificantes podem aumentar a resistência ao cisalhamento do material da peça, e, consequentemente, as forças de usinagem, o que prejudica o acabamento da peça usinada. Um revestimento aplicado sobre a ferramenta pode atuar como lubrificante, e também ajuda a diminuir a afinidade química entre o material da peça e a ferramenta, contribuindo para a melhoria do acabamento (MACHADO *et al.*, 2015). Os parâmetros de rugosidade são utilizados como parâmetros para o controle de qualidade da superfície usinada fabricada. Dessa forma, várias pesquisas envolvem medições desses parâmetros de rugosidade e os utilizam para quantificar a usinabilidade de materiais. No presente trabalho, esses parâmetros foram utilizados para comparar a qualidade das superfícies usinadas com aplicação de diferentes fluidos de corte. Xavior e Adithan (2009) encontraram que o óleo de coco, usado como fluido de corte, proporcionou menores valores de rugosidade (R_a) e do desgaste de flanco das ferramentas ($V_{B\max}$) na usinagem de um aço inoxidável AISI 304, comparando com a usinagem realizada aplicando-se um óleo emulsãoável de

base mineral e um óleo integral também de base mineral. Ozcelik *et al.* (2011) pesquisaram o desempenho de fluidos de corte de base vegetal, um baseado em óleo refinado de canola e outro em óleo refinado de girassol, incluindo diferentes porcentagens de aditivos EP (extrema pressão), durante o torneamento de um aço inoxidável AISI 304L, comparando com o desempenho de dois fluidos comerciais de base mineral e com a usinagem a seco. De todas as comparações, os melhores resultados de rugosidade Ra e de desgaste de flanco VB foram obtidos com o óleo de canola acrescentado de 8% de aditivo EP. Os pesquisadores Sharma e Sidhu (2014) realizaram usinagem “quase seca” de aço D2 (um aço-ferramenta com alto teor de carbono e de cromo, usado para fabricar ferramentas para trabalho a frio) com técnicas de pulverização e usaram um fluido de corte de base vegetal LB-6000, considerado não tóxico e biodegradável. Eles selecionaram três velocidades de corte para investigar o efeito do MQL na rugosidade da superfície e na temperatura de corte. Observou-se uma melhora significativa na rugosidade da superfície em usinagem quase seca em comparação com a usinagem a seco, durante o processo de torneamento. Devido ao arrefecimento e à penetração efetivos dos aerossóis na zona de corte, a temperatura também foi reduzida em 50% em relação à usinagem a seco (XAVIOR e ADITHAN , 2009; SHARMA e SIDHU, 2013; OZCELIK *et al.*, 2011).

Marques (2015), adicionou lubrificante sólidos aos fluidos de corte e usinou a liga Inconel 718 (torneamento) com ferramentas de metal duro e cerâmicas, usando o fluido aplicado sob a forma de jorro e MQL, e observou que nas duas formas de aplicação do fluido de corte, a utilização dos lubrificantes sólidos melhorou o acabamento superficial da superfície formada, apesar desse comportamento não ter sido evidenciado quando da utilização de ferramentas cerâmicas *whiskers*. Finzi (2017), usando fluidos contaminados micro-biologicamente por sete e setenta dias, obteve superfícies com rugosidades piores quanto por mais tempo o fluido fosse contaminado (MARQUES, 2015; FINZI, 2017).

2.4. FORÇAS DE USINAGEM

Segundo Machado *et al.* (2015), é importante conhecer as forças de usinagem, que agem sobre a aresta cortante, pois a partir do estudo de suas

componentes é possível calcular a potência necessária para o corte, bem como as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, além de manter relação com o desgaste das ferramentas de corte. A força de usinagem pode ser responsável direta pelo colapso da ferramenta de corte por deformação plástica da aresta, além de influenciar diretamente no desenvolvimento de outros mecanismos e processos de desgaste. Pode também representar um índice de usinabilidade do material da peça, e também ser utilizada como parâmetro para controle adaptativo do processo (SALES, 1999). A Figura 2.18 mostra, com corte tridimensional, as componentes da força de usinagem no processo de torneamento.

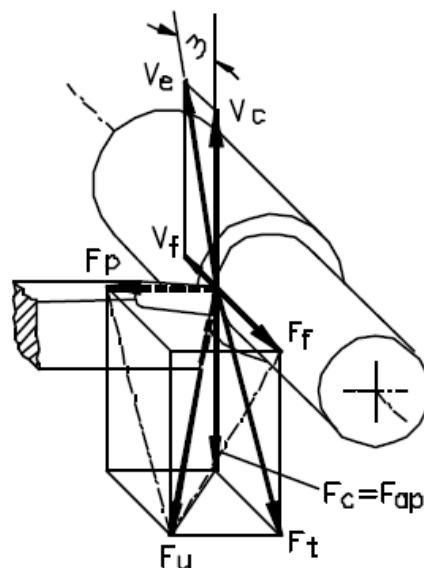


Figura 2.18. Componentes das forças de usinagem no processo de torneamento.

Os três componentes básicos da força de usinagem são:

- **Força de corte (F_c):** é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte.
- **Força de avanço (F_f):** é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção do avanço, dada pela velocidade de avanço.
- **Força passiva ou de profundidade (F_p):** é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

A força de usinagem é normalmente decomposta nos seus três principais componentes, valendo a relação da equação 2.2:

$$F_U = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad \text{Equação 2.2}$$

Os fatores que contribuem para a movimentação livre do cavaco sobre a superfície de saída atuam com o objetivo de diminuir a força de usinagem. Além das condições na interface cavaco/ferramenta, a resistência mecânica do material da peça também é considerada para o cálculo da força de usinagem, e todos os parâmetros de saída do processo, como ângulo de cisalhamento, espessura do cavaco, velocidade de saída do cavaco, entre outros, são, direta ou indiretamente consequências desses dois fatores ((MACHADO *et al.*, 2015)).

- a) **Material da peça:** de maneira geral, quanto maior a resistência do material, maior é a resistência ao cisalhamento e as forças de usinagem serão superiores.
- b) **Material da ferramenta:** a afinidade química dos materiais da ferramenta e da peça pode atuar principalmente na área de seção de corte. Se a tendência for produzir uma zona de aderência estável e forte, a força de usinagem poderá ser aumentada.
- c) **Velocidade de corte:** Em baixas velocidades de corte e na ausência de aresta postiça de corte, os valores da força de corte caem consideravelmente com o aumento da velocidade. Este comportamento é atribuído à redução da resistência ao cisalhamento do material, devido ao aumento da temperatura nas zonas de cisalhamento primário e secundário. Porém, na faixa em que é utilizada em níveis industriais, sem a presença da aresta postiça de corte, a velocidade de corte apresenta pouca influência na força de usinagem. Pela maior geração de calor e consequente redução da resistência ao cisalhamento do material, e pela ligeira redução na área de contato cavaco-ferramenta, existe uma tendência de redução da força de usinagem com o aumento da velocidade de corte.
- d) **Avanço e Profundidade de Corte:** o aumento dessas duas forças eleva a força de usinagem numa proporção direta, quase linear. A área da seção de corte (A_s) é definida pelo produto entre o avanço e a profundidade de corte. A

força de usinagem aumenta porque as áreas dos planos de cisalhamentos primário e secundário são aumentadas com o aumento dessas grandezas. A figura 2.19 ilustra a influência desses parâmetros e da resistência do material da peça na força de corte.

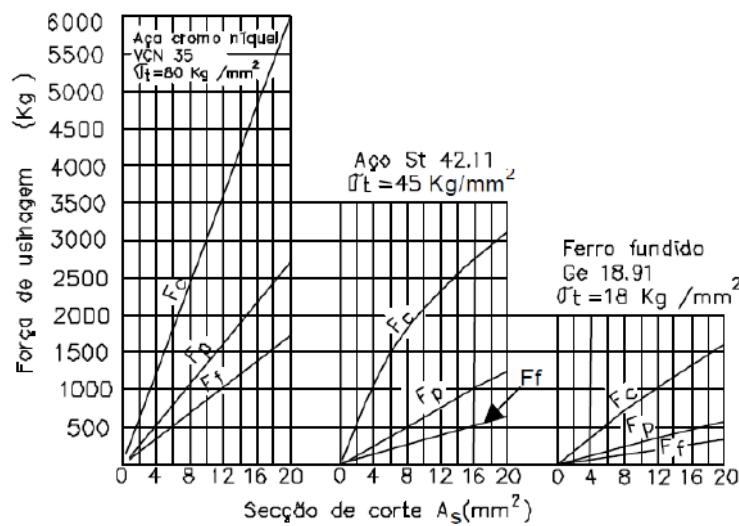


Figura 2.19. Influência da seção de corte e da resistência do material da peça nas componentes da força de usinagem (Fonte: Ferraresi, 1977; MACHADO *et al.*, 2015; SALES, 1999).

- e) **Geometria da ferramenta:** O ângulo mais influente é o de saída, γ_0 . Uma redução deste ângulo tende a aumentar a área de contato e impor uma maior restrição ao escorregamento do cavaco por sobre a superfície de saída, aumentando a força de usinagem. O ângulo de posição, χ_r , também influencia a força de usinagem. O seu aumento, desde que o ângulo de posição lateral não se torne pequeno o suficiente para que a aresta lateral de corte entre em ação, promove uma ligeira redução nas forças de usinagem. A influência destes ângulos é mostrada na Figura 2.20.

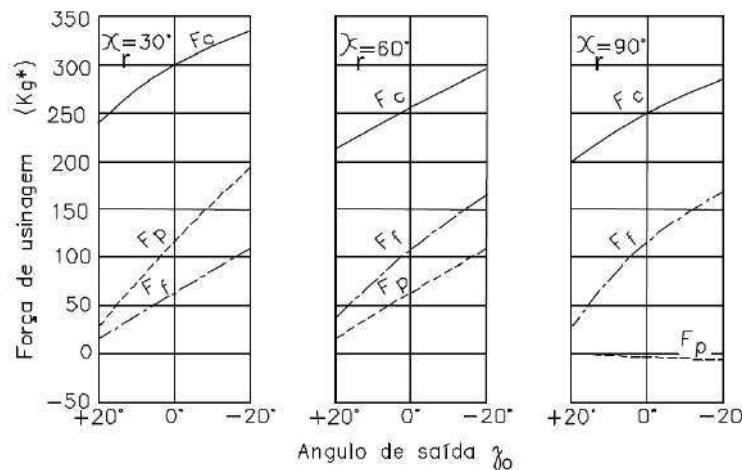


Figura 2.20. Influência dos ângulos de saída (γ_0) e de posição (χ_r) nas forças de usinagem (Fontes: Ferraresi, 1977; Machado *et al.*, 2015).

- f) **Estado da Afiação da Ferramenta:** O desgaste da ferramenta pode alterar a sua geometria. Porém, o efeito maior deve-se ao aumento da área de contato com o cavaco ou com a peça, com a evolução do desgaste de cratera e de flanco. Com isto, normalmente há um aumento da força de usinagem. Mas em situações em que o desgaste de cratera é predominante, a sua evolução aumenta o ângulo de saída, γ_0 , reduzindo a força de corte.
- g) **Utilização de fluido de corte:** Se na ação do fluido predominar a lubrificação, há uma redução da área de contato e diminuição da força de usinagem. Entretanto, se prevalecer a refrigeração, o uso do fluido de corte pode aumentar a força de usinagem, por promover um aumento da resistência ao cisalhamento do material nas zonas de cisalhamento, devido a uma redução da temperatura.

A medida da força de usinagem pode ser realizada de forma direta ou indireta. Na forma indireta, mede-se o deslocamento de molas, utilizando-se meios de medida mecânicos, elétricos, pneumáticos e hidráulicos. Por meio de correlações previamente estabelecidas, mede-se a força. Na forma direta, a força é medida baseado na piezeletricidade, na magneto-estrição ou na magneto-elasticidade (FERRARESI, 1977). A evolução dos sistemas de medição de força de usinagem conduziu aos atuais dinamômetros piezelétricos, com resolução, sensibilidade e

faixa de operação adequadas às aplicações práticas e acadêmicas (MACHADO, et al., 2015). Uma foto de uma dinamômetro piezelétrico é mostrada na figura 2.21.

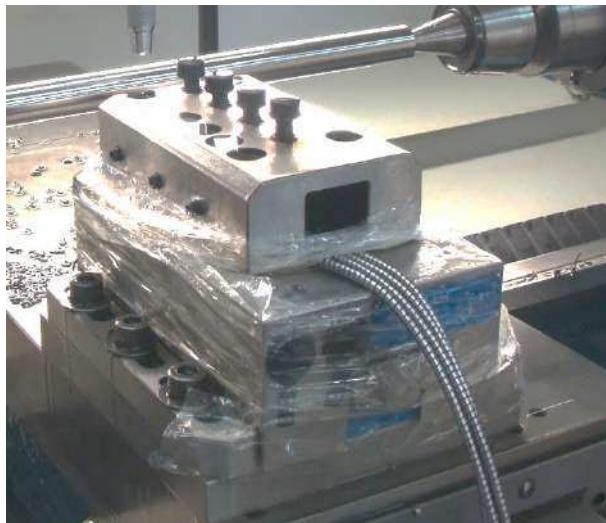


Figura 2.21. Plataforma piezelétrica (dinamômetro) usado para medição das forças de usinagem

2.5. TEMPERATURA DE USINAGEM

Da energia total consumida em usinagem, quase toda ela (aproximadamente 98%) é convertida em calor, calor esse que pode produzir temperaturas muito elevadas na interface cavaco-ferramenta (TRENT e WRIGHT, 2000; MACHADO, et al., 2015; GROOVER, 2014). As temperaturas elevadas podem reduzir a vida da ferramenta, produzir cavacos quentes que colocam em risco a segurança do operador da máquina e causar imprecisões dimensionais na peça, devido à expansão térmica do material trabalhado.

De acordo com Machado et al. (2015), o custo da usinagem depende da quantidade de material removido, e pode ser reduzido quando as velocidades de corte e/ou de avanço aumentam. Entretanto, há limites para essas velocidades, acima dos quais a vida da ferramenta é drasticamente reduzida. Em usinagem de ligas de níquel, por exemplo, é gerado um maior aquecimento da ferramenta, o que a leva a um colapso em um curto tempo de usinagem. Por causa desses e outros motivos, é importante compreender quais fatores influenciam a geração de calor,

bem como de que maneira os fluxos de calor e as temperaturas são distribuídos na ferramenta e na peça, próximo à aresta cortante.

As fontes geradoras de calor no processo de usinagem são a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento e os atritos entre cavaco/ferramenta e ferramenta/peça (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008). Na figura 2.22 é possível observar as regiões onde o calor é percebido durante a formação dos cavacos.

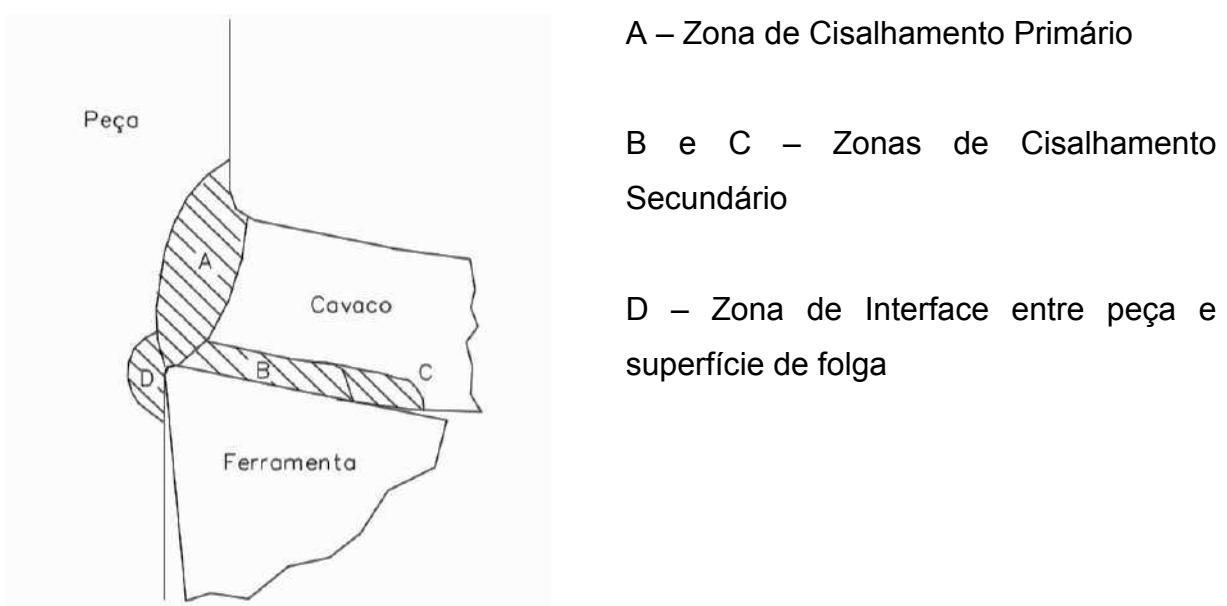


Figura 2.22. Zonas de geração de calor em Usinagem. Fonte: Machado et al, 2015

Uma boa parte do calor gerado na zona de cisalhamento primário é dissipada pelos cavacos, uma pequena porcentagem é dissipada pela peça e outra pelo ambiente. O restante vai para a ferramenta de corte. Como a região da ferramenta que recebe esse calor é reduzida (área da interface cavaco/ ferramenta e ferramenta/peça) e não muda com o tempo, altas temperaturas se desenvolvem ali, temperaturas essas que contribuem muito para o desgaste das ferramentas (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008; MACHADO, COELHO, *et al.*, 2015; NELSON e SCHAILBLE, 1988).

O calor gerado na zona secundária de cisalhamento tem a maior influência sobre o desempenho das ferramentas e é praticamente um fator limitante para a taxa de remoção de material, especialmente por meio do aumento da velocidade de

corte. Esse fato torna as temperaturas na superfície de saída da ferramenta as maiores do sistema.

Na maioria das vezes, o aquecimento da peça é considerado benéfico, já que reduz a tensão de cisalhamento do material, tornando a usinagem mais fácil, mas também pode alterar as propriedades do material nas regiões próximas à superfície, e causar problemas dimensionais na peça (SANTOS e SALES, 2007).

Por tantos motivos, a temperatura de usinagem é uma das variáveis mais influentes nos processos de usinagem, justificando a grande quantidade de trabalhos que buscam avaliar as influências no desempenho das ferramentas de corte. Apesar disso, medir a temperatura de corte não é uma tarefa fácil, por causa das condições dinâmicas do processo, além da interface ser praticamente inacessível, tornando os processos de medição imprecisos.

A medição da temperatura de usinagem sempre foi um desafio experimental, e várias metodologias foram desenvolvidas, sendo a maioria delas empregada para medir a temperatura da ferramenta. Dentre essas metodologias, a mais utilizada é a medição da força termoelétrica entre a ferramenta e a peça, também chamado de método do termopar ferramenta-peça (COSTA, 2004; MACHADO, *et al.*, 2015).

Nesta técnica a interface entre a ferramenta e a peça é tratada como uma junta quente de um termopar, já que esta região é bastante íntima e os materiais de peça e ferramenta possuem propriedades diferentes entre si. Um esquema de montagem desse método pode ser visto na figura 2.23.

O ponto Q de contato entre ferramenta e peça representa a junta quente. Os pontos F1, F2, F3 e F4 representam as juntas frias. A cuba é preenchida com mercúrio até que seja estabelecido o contato elétrico do disco com o elemento E, garantindo o fechamento do circuito. Os fios A1 e A2 fazem a conexão do sistema com o milivoltímetro V, que indica o valor da F.E.M (força eletromotriz) gerada. O sistema deve ser calibrado para fornecer valores de temperatura como função da tensão elétrica.

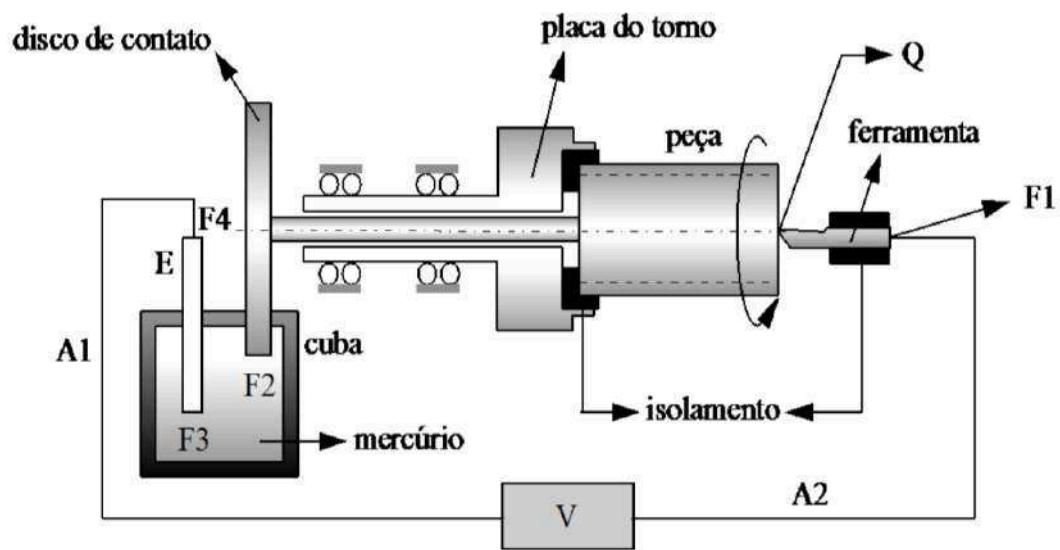


Figura 2.23. Esquema para medição da temperatura de usinagem pelo método do termopar ferramenta-peça. Fonte: MACHADO *et al.*, 2015

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

O material utilizado para usinagem foi um aço ABNT 1050, em forma de barras cilíndricas com 54 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento. A composição química do material está mostrada na tabela 3.1 e algumas propriedades são descritas na tabela 3.2. Os ensaios de usinagem eram feitos até que se atingisse o diâmetro de aproximadamente 25 mm, para evitar possíveis problemas de rigidez durante a usinagem.

Tabela 3.1. Composição química do material ABNT 1050 (fornecido pelo fabricante Gerdau, %wt)

C	Mn	Si	P	Cu	S	Cr	Ni	Mo	Sn
0,52	0,730	0,24	0,013	0,08	0,022	0,15	0,11	0,03	0,008
Al	V	Nb	Ti	B	Ca	As	O	N	Fe
0,016	0,02	0,001	0,0009	0,0004	0,0006	0,003	12 ppm	83 ppm	Balance

Tabela 3.2. Propriedades mecânicas típicas do material da peça – Aço ABNT 1050

Material	ρ Massa especif. (ton/m ³)	E (GPa) Módulo Elastic. Longitud.	G (GPa) Módulo Elastic. Transver.	Tensão de Escoamento σ Tração (MPa)	Tensão de Escoamento τ Cisalh. (MPa)	ϵ Elong. Percent. (%)	α Coef. Dil. Térmica (10 ⁻⁶ C ⁻¹)
Aço 1050	7,86	210	80	340	200	15	11,7

O material possui dureza média de 255 HV e sua microestrutura pode ser visualizada na Figura 3.1. Foram feitas cinco medidas das durezas na

borda, no centro e em um ponto entre a borda e o centro da amostra, e foi calculada a média desses valores para se chegar no resultado de 255 HV. A carga utilizada foi de aproximadamente 400N e a amostra foi atacada com Nital a 2% para revelar a microestrutura. Observa-se na figura 3.1 que a microestrutura possui uma matriz predominantemente perlítica, com a presença de grãos ferríticos menores. Trata-se, portanto, de uma microestrutura característica de um aço hipoeutético ABNT 1050.

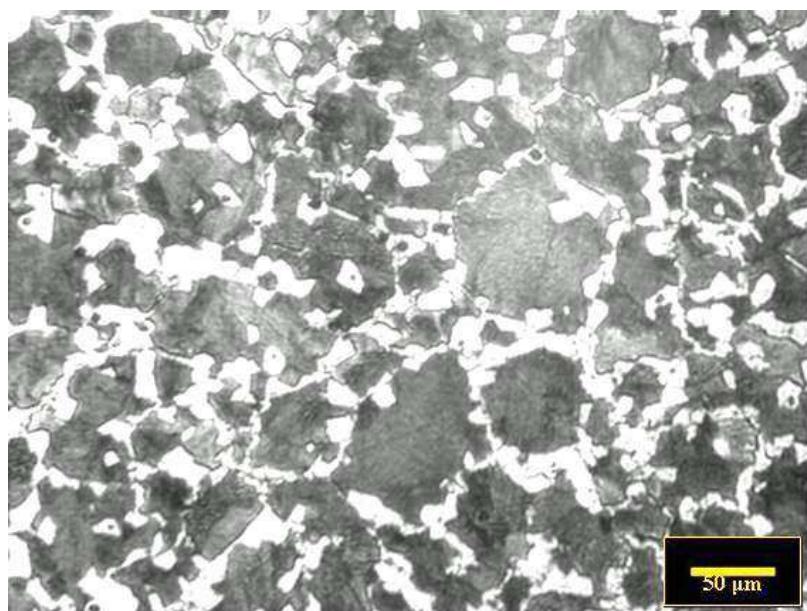


Figura 3.1: Microestrutura do aço ABNT 1050 usado nos ensaios – Ataque Nital 2%

Os ensaios de usinagem foram feitos em um torno CNC Multiplic 35D, fabricado pela Indústrias Romi S.A., com 11 kW de potência e variação de velocidade de 3 a 3000 rpm. Foram usadas ferramentas da série T9035 fabricadas pela OSG/Tungaloy, com a seguinte especificação ISO: SNMG120408-DM. As ferramentas dessa série são revestidas com tripla camada em CVD (deposição química a vapor), uma camada de espessura fina de α -alumina com alta temperatura de estabilidade, e uma coluna de TiCN (carbonitreto de titânio) com granulação refinada e maior tenacidade. Além disso, as ferramentas possuem o revestimento mais externo de TiN (nitreto de titânio), o que proporciona menores coeficientes de atrito entre a ferramenta e os cavacos. O suporte para ferramentas usado tem a especificação ISO PSBNR 2525 M12, e também foi fabricado e fornecido pela OSG/Tungaloy.

Os fluidos de corte utilizados nos ensaios são comerciais, fabricados pela Castrol Industrial Inc., sendo dois de base vegetal e um de base mineral, usado para comparação. Os fluidos foram os seguintes:

- **FLUIDO A** - fluido emulsionável de base éster (vegetal) isento de óleo mineral, indicado especialmente para usinagem de aços carbono, aços liga e inoxidáveis. Informações sobre componentes (dados da ficha do produto, fornecida pelo fabricante):

NOME DO INGREDIENTE	%
Ésteres de ácido fosfórico e amina neutralizada	≥6 - <10
Trietanolamina	≥5 - <10
Ácidos gordos, tal oil, produtos de reação com óxido de etileno, etoxilados	≥5 - <10
N, N'-metilenobismorfolina álcoois, C16-18 e C18 não-saturado, etoxilado	≥3-<5
3-iodo-2-propinil butilcarbamato	≥0,3 - <1

- **FLUIDO B** – fluido semissintético (base mineral), indicado para usinagem geral de ferros fundidos, aços carbono, aços liga e inoxidáveis. Informações sobre componentes (dados da ficha do produto, fornecida pelo fabricante):

NOME DO INGREDIENTE	% POR PESO
Óleo básico - altamente refinado	15 - 20
N,N – metíleno bismorfolina	5 - 10
Trietanolamina	5 - 10
Ésteres de ácido fosfórico e amina neutralizada	1 - 5
Ácidos carboxílicos de amina neutralizados amino	1 - 5
2-aminoetanol	1 - 5
2-Metilpentano-2,4-diol	0.1 - 1

- **FLUIDO C** – fluido sintético bioestável (base vegetal), indicado especialmente para usinagem de ferros fundidos e metais ferrosos de alta a média usinabilidade. É um fluido isento de cloro, nitritos, fenóis e bário, e o fabricante promete uma longa vida útil do fluido, com menos

descartes, boa proteção interoperacional das peças usinadas e excelente poder de dispersão e limpeza (detergente). Informações sobre componentes (dados da ficha do produto, fornecida pelo fabricante):

NOME DO INGREDIENTE	% POR PESO
Trietanolamina	20 - 25
N,N – metileno bismorfolina	1 - 5

Esses fluidos de corte foram aplicados sobre a ferramenta de corte, na posição conhecida como “sobre-cabeça”, sob uma vazão de 4,5 l/min nas concentrações de 3%, 7% e 10%, sendo que em alguns ensaios foram aplicados somente na concentração de 7%, como no ensaio de vida da ferramenta e de temperatura de usinagem.

A tabela 3.3 mostra um resumo das características e das principais propriedades físico-químicas desses fluidos de corte.

Tabela 3.3: Propriedades físico-químicas dos fluidos de corte utilizados.

Propriedades \ Fluido	FLUIDO A (emulsionável de base vegetal)	FLUIDO B (semisintético emulsionável de base mineral)	FLUIDO C (sintético de base vegetal)
Características gerais	Fluido bioestável, com propriedades anticorrosivas e antiespumantes, isento de boro, nitritos e fenóis, contém inibidores de corrosão, ácidos graxos, lubrificantes sintéticos e bactericida.	Mistura química contendo óleos minerais altamente refinados, água, emulsificantes, aditivos de performance e biocidas.	fluido sintético bioestável, com propriedades anticorrosivas e antiespumantes, isento de boro, parafina clorada, nitritos e fenóis; contém anticorrosivos, lubrificantes sintéticos e bactericidas.
pH (solução a 5%)	9,1	9,5	9,2
Ponto de ebulação		Acima de 100°C	
Ponto de fulgor		Produto a base de água (não inflamável)	
Densidade a 20°C (g/mL)	1,071	1,020	1,060
Solubilidade		Solúvel em água	

3.2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Foram feitos ensaios experimentais, tanto envolvendo usinagem, como sem envolver usinagem, para caracterizar os fluidos de corte e seu desempenho. Os ensaios realizados estão mostrados na figura 3.2 e a descrição de cada ensaio realizado está mostrada a seguir.

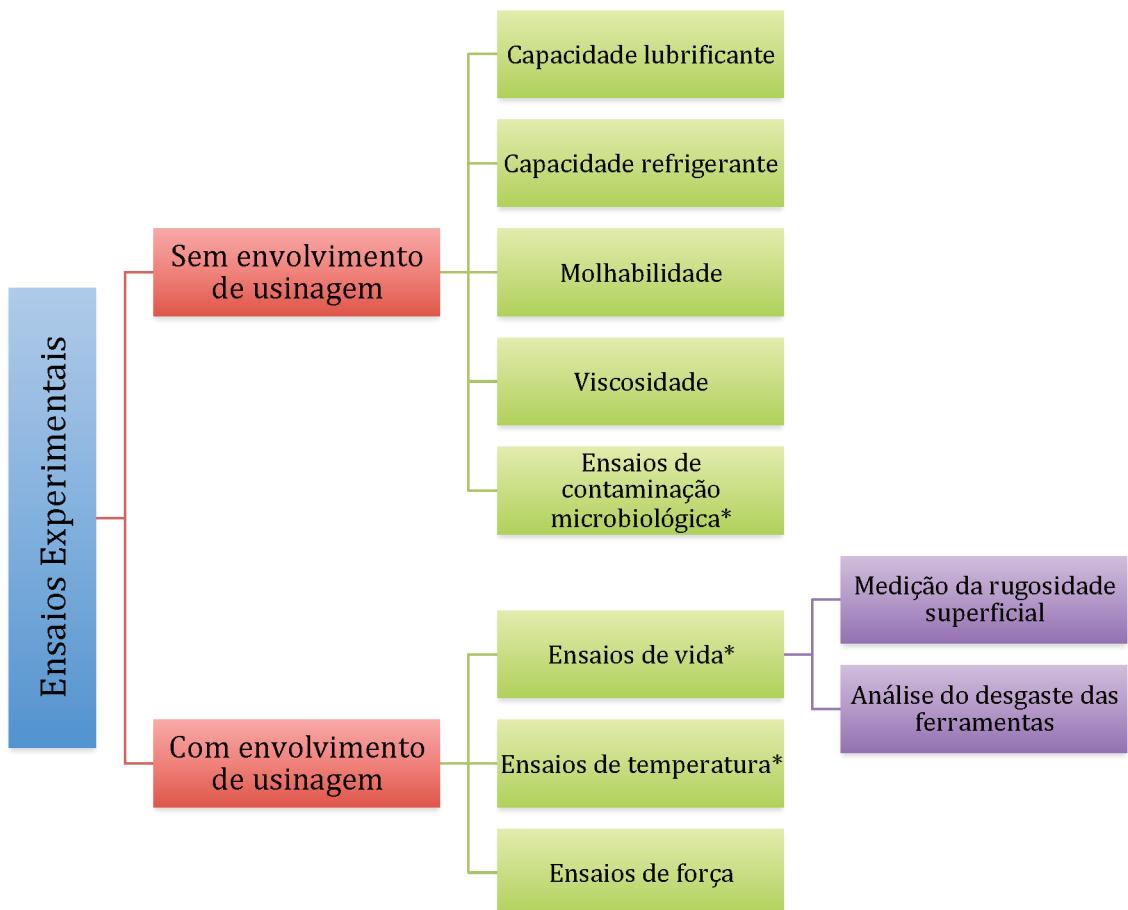


Figura 3.2: ENSAIOS EXPERIMENTAIS REALIZADOS; OS ENSAIOS MARCADOS COM * FORAM FEITOS USANDO APENAS A CONCENTRAÇÃO DE 7%, OS DEMAIS NAS TRÊS CONCENTRAÇÕES ESTUDADAS: 3%, 7% E 10%

3.2.1. ENSAIOS PARA MEDIDAÇÃO DE CAPACIDADE LUBRIFICANTE - *Reciprocating*

Neste ensaio utilizou-se o método de deslizamento tipo *starving*, onde uma gota do fluido a ser analisado era colocada na região de contato entre corpo e contra-corpo e um deslizamento alternativo entre eles era realizado.

Os ensaios foram realizados utilizando-se um Tribômetro Universal Plint® modelo TE67, fabricado por *Plint & Partners LTD.*, no modo alternativo, com amplitude de 5mm e frequência de 2Hz. O tribômetro é composto de uma célula de carga para medir a força de atrito e um sistema de medição com potenciômetro de contato, viabilizando a percepção da formação ou não de isolamento entre o corpo e o contra-corpo durante o ensaio. O sistema possui ainda um sensor LVDT (Transformador Diferencial Variável Linear), que permite medir a posição do corpo em relação ao contra-corpo em cada ciclo do ensaio. Uma foto do equipamento está mostrada na figura 3.3. Os dados foram adquiridos por uma placa de aquisição ligada a um computador com o software Labview, onde um programa de aquisição foi implementado para adquirir os sinais referentes aos ensaios. A análise dos dados foi feita de acordo com metodologia descrita por Oliveira Júnior (2013).

Foram usados corpos de prova redondos, de aço ABNT 1050 (diâmetro de 50 mm e espessura de 15 mm), e um contra corpo de esferas de aço AISI 52100 com diâmetro de 5mm. Uma gota de $0,3 \mu\text{l}$ era colocada sobre a superfície do corpo de prova, e em seguida foi aplicado um carregamento incremental com adição de uma carga de 6,867 N em intervalos de 10 minutos. Foram testados os três fluidos de corte nas concentrações de 3%, 7% e 10%.

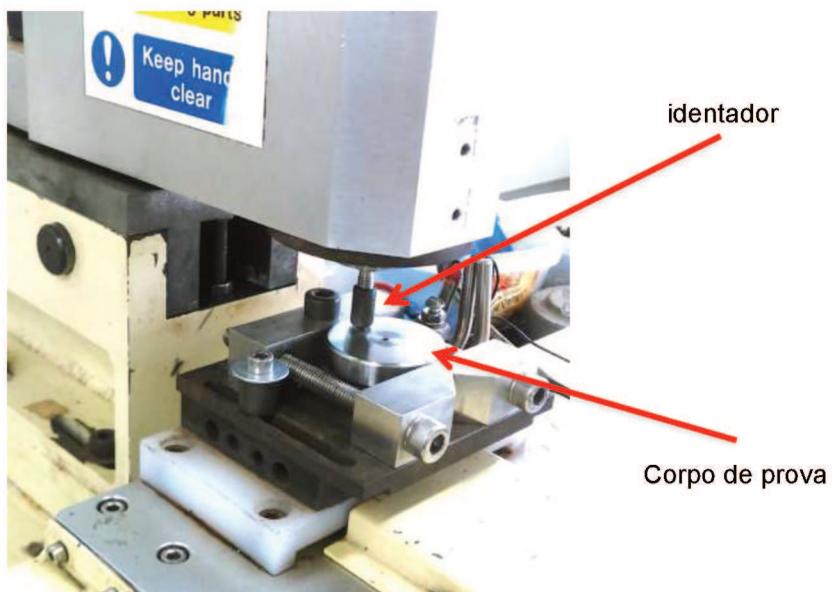


Figura 3.3: Equipamento usado nos ensaios de deslizamento *reciprocating*

3.2.2. Ensaios para medição de capacidade refrigerante

Os ensaios para medição da capacidade refrigerante dos fluidos de corte foram realizados tendo como base o procedimento de Sales (1999). O ensaio consiste em aquecer um corpo de prova a uma determinada temperatura e prendê-lo à placa do torno e deixá-lo girar a uma velocidade específica enquanto o fluido de corte é aplicado sobre esse corpo de prova aquecido. A temperatura no centro do corpo de prova é medida até que chegue à temperatura ambiente, e compara-se os tempos para que a temperatura de 40°C seja atingida. As curvas de resfriamento (em relação ao tempo) foram então traçadas para cada fluido de corte.

O torno utilizado para este ensaio já foi descrito neste capítulo, torno CNC Multiplic 35D da ROMI. Foram fabricados corpos de prova cilíndricos a partir de uma barra de aço ABNT 1050, com dimensões de 40 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento, preparados ainda com um furo central em uma das extremidades, medindo 35 mm de profundidade e $25,4\text{ mm}$ de diâmetro, como mostrado na figura 3.4.

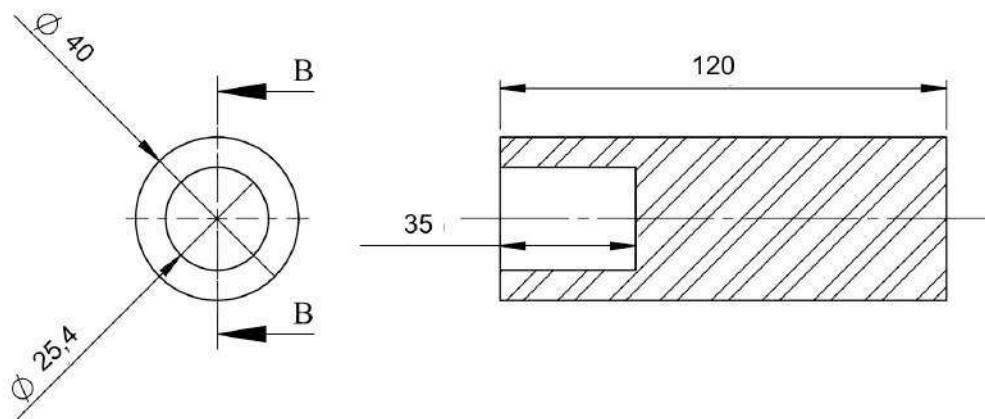


Figura 3.4: Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios para verificação da capacidade refrigerante dos fluidos de corte

Os corpos de prova foram aquecidos em um forno elétrico do tipo Mufla Digital Microprocessado, apresentando dimensões internas de $200\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, capacidade de aquecimento de até 1200°C , modelo Magnu's. Os corpos de prova eram aquecidos até a temperatura de 350°C e mantidos nesta temperatura por pelo menos uma hora. Após esse

tempo, o corpo de prova era fixado na placa do torno e este era ligado a uma rotação de 180 *rpm*, enquanto o fluido era aplicado tangencialmente à peça. Por causa do resfriamento no tempo que o corpo de prova era retirado do forno e preso à placa do torno, a temperatura inicial para as medições foi considerada de 262°C.

Uma câmera térmica, modelo FLIR A325, do tipo microbolometer, foi utilizada para fazer a aquisição das temperaturas, cuja análise ocorreu em faixa de espectro de 7,5 a 13,0 μm . Esta câmera possui uma resolução de 320 x 240 *pixels*, com taxa de aquisição de até 60 *Hz* e precisão de $\pm 2^\circ\text{C}$. Para as medições foi selecionado o nível de temperatura de 0°C a 350°C e utilizado o software Thermocam Research 2.9 no qual foram inseridos os parâmetros necessários (distância da câmera/peça; temperatura ambiente; umidade do ar; transmitância, etc.) para análise das temperaturas obtidas durante os testes. Os dados eram coletados até chegar à temperatura de 40°C (quando o corpo de prova atingia essa temperatura, o ensaio era parado), o que exigia, em média, uma aquisição de 4.000 pontos. Além do ensaio com aplicação de fluidos de corte, foi feito também o ensaio a seco, e o tempo para que a peça chegasse à temperatura de 40°C, obviamente, foi maior do que os tempos medidos quando os fluidos de corte eram aplicados. Cada fluido de corte forneceu uma curva de resfriamento do corpo de prova no tempo.

3.2.3. Ensaios de Molhabilidade – Medição do Ângulo de Contato

Os ensaios de molhabilidade foram realizados no Laboratório de Biomateriais e Engenharia de Superfícies da PUC-PR (Pontifícia Universidade Católica do Paraná), localizada em Curitiba – PR. A molhabilidade foi avaliada através de um goniômetro Krüss *easy drop* pelo método da gota séssil, utilizando uma gota de $0,3\mu\text{l}$ do fluido a ser analisado sobre uma amostra previamente preparada (lixada e polida) fabricada de aço ABNT 1050. As amostras eram redondas, com diâmetro de 50 mm e espessura de 15 mm . As imagens foram adquiridas por 60 segundos (uma imagem a cada segundo) e o valor do ângulo de contato foi calculado como a média dos ângulos de contato de ambos os lados da gota. Buscando o ângulo de contato na fase de equilíbrio

da gota, foram considerados os ângulos após 30 segundos de contato com as amostras. O goniômetro utilizado está mostrado na figura 3.5.

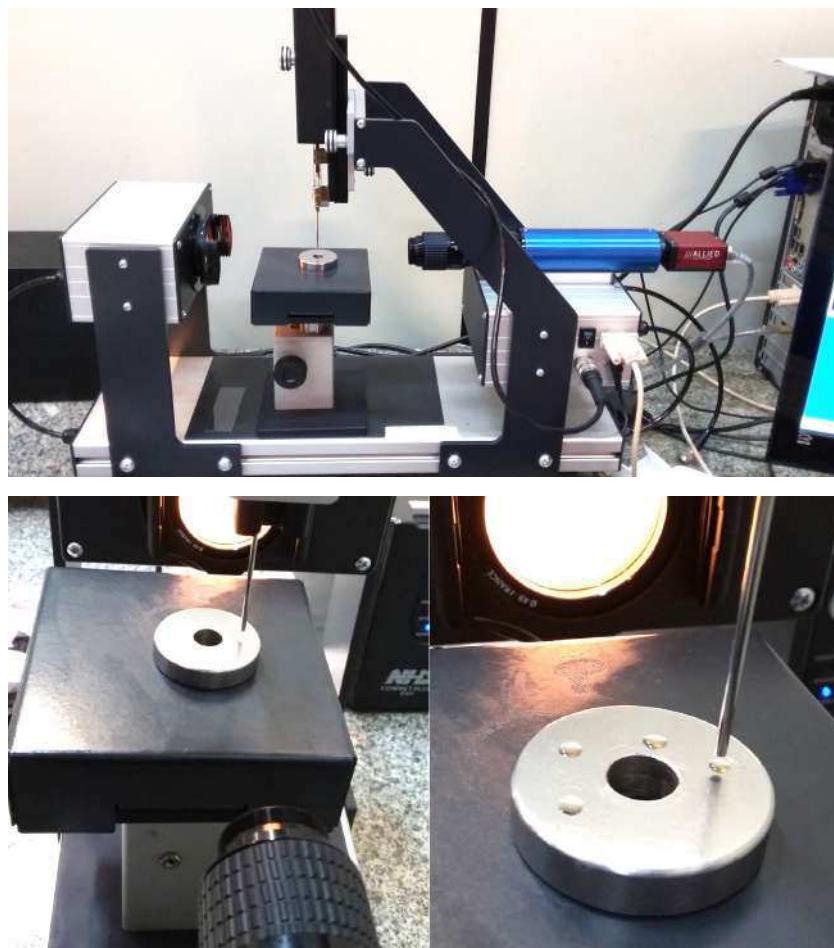


Figura 3.5: Equipamento usado para a medição da molhabilidade

3.2.4. Ensaios de Viscosidade

As viscosidades dinâmica e cinemática e a massa específica de cada fluido de corte foram medida em um Viscosímetro Anton Paar, modelo SVMTM 3000 situado no Laboratório de Nanofluidos LMEst na FEMEC-UFU. O equipamento combina a precisão exigida pela norma ASTM D7042 (2016), que é equivalente à norma ASTM D445-97 (2001), e medição do índice de viscosidade de acordo com ASTM D2270-10 (2016) em um dispositivo de bancada. Os ensaios eram feitos a 40°C e uma quantidade de $2,5\text{ ml}$ de fluido era colocada a cada vez no equipamento, através de seringas estéreis de 5 ml , e o equipamento realizava quatro leituras. No final era feita a média das

leituras, resultando nos valores médios de viscosidade dinâmica, cinemática e de massa específica. Uma foto do equipamento utilizado pode ser vista na figura 3.6.



Figura 3.6: Foto do viscosímetro usado para as medições

3.2.5. Ensaios de Envelhecimento por Contaminação Microbiológica

Os ensaios para envelhecer o fluido foram realizados no Laboratório de Microbiologia Molecular do ICBIM – UFU. Três fluidos de corte foram contaminados com uma alta carga microbiana por 51 dias, com quatro microrganismos diferentes, e no final deste tempo foram realizados ensaios para verificar se as propriedades desses fluidos foram alteradas por esta contaminação. A contaminação foi realizada de acordo com a norma ASTM E2275 (2013) com modificações. Os microrganismos inoculados foram: *Stenotrophomonas maltophilia*, *Pseudomonas* spp., *Acinetobacter lwoffii* e Bacilo Gram positivo.

A contaminação foi feita da seguinte maneira: cada microrganismo foi colocado em uma placa com BHI ágar e deixado na estufa a 37°C por 24 horas. Após este tempo, era feita a inoculação: uma UFC (unidade formadora de colônia) era colocada num erlenmayer (figura 3.7) com 80 ml BHI caldo (meio de cultura – Brain Heart Infusion) por 72 horas. O caldo contaminado era

então colocado em tubos Falcon de 15 ml e centrifugado a 4000 rpm por 8 minutos (tubos e centrífuga podem ser vistos na figura 3.8), para separar o “*pellet*” do caldo. Após a centrifugação, o caldo era descartado e o *pellet* era lavado com o próprio fluido de usinagem, e colocado no recipiente com este mesmo fluido de usinagem para que ele fosse contaminado, mostrados na figura 3.9.



Figura 3.7: Erlenmayers com caldo BHI (meio de cultura para as bactérias)



(a) Centrífuga



(b) tubos Falcon usados para centrifugar os meios de cultura

Figura 3.8: Centrífuga e tubos Falcon usados para separar os pellets a serem inoculados para contaminação dos fluidos de corte

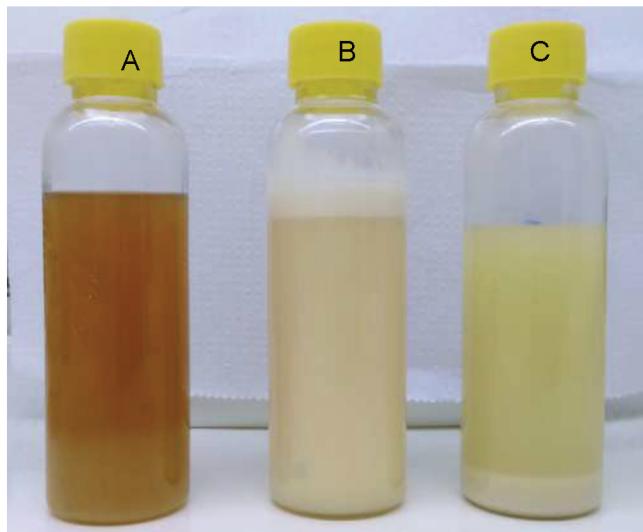


Figura 3.9: Recipientes com fluidos de corte já contaminados (50ml)

O monitoramento do procedimento era feito em cada fluido, através de diluição, cultivo e contagem em meio sólido a cada dois dias. Foram retiradas quatro alíquotas de $10\ \mu l$ de cada fluido e colocadas as quatro gotas equidistantes no centro da placa com meio sólido (BHI ágar). Essas gotas eram então espalhadas formando quatro colunas na placa (como mostrado nas figuras 3.10 e 3.11) e levada para a estufa por 24 horas para o crescimento. Após o crescimento, era feita a leitura e a contagem das unidades formadoras de colônias (UFC). Em caso de crescimento excessivo, era feita uma diluição seriada em salina, para realizar a contagem novamente.



Figura 3.10: Placas com bactérias. Na placa da esquerda é possível observar três tipos diferentes de bactérias. A placa da direita mostra um número incontável de UFCs, sendo portanto necessária a diluição seriada.



Figura 3.11: Placa com quantidade contável de UFCs, sendo possível observar dois tipos diferentes de bactérias, provavelmente Gram positivas.

3.2.6. Ensaios de Vida da Ferramenta

Os ensaios de vida da ferramenta com os fluidos A, B e C na aplicação em jorro (fluidos na concentração de 7%), e na usinagem a seco foram realizados com as mesmas condições de corte. Foram usadas duas velocidades de corte e dois avanços da ferramenta (níveis -1 e +1), totalizando quatro combinações de parâmetros de corte baseadas num planejamento factorial completo 2^2 , e mostradas na tabela 3.3. Essas combinações foram feitas para cada fluido, isto é, quatro experimentos para cada fluido testado.

Tabela 3.3. Parâmetros de corte utilizados nos testes de vida

Condição	vc [m/min]	f [mm/rot]
1	200	0,20
2	200	0,32
3	350	0,20
4	350	0,32

O critério de fim de vida da aresta de corte foi o $V_{B_{\max}}$ (desgaste de flanco máximo) $V_{B_{\max}} \geq 0,6\text{mm}$, baseado na norma ISO Standard 3685 para testes de vida no torneamento com ferramentas de corte monocortantes (ISO 3685, 1993). Como alguns ensaios eram muito longos, o critério de 30 minutos de usinagem também foi utilizado como parada no ensaio. O desgaste foi medido, durante intervalos regulares no final de cada passada da ferramenta, em um microscópio ótico (estereomicroscópio) Olympus, modelo Evolution LC Color SZ6145TR com câmera digital e usando o software de análise de

imagens Image-Pro Express 5.1, usando um aumento de 45X. Ao final dos testes de vida, as ferramentas foram levadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV, para análise mais detalhada dos mecanismos de desgaste. Foi utilizado um equipamento da marca HITACHI TM 3000 e EDS modelo Swift ED3000, mostrado na foto da figura 3.12, que proporciona aumentos de até 30.000X. O EDS (espectroscopia por dispersão de energia) foi utilizado para verificar a presença de material aderido à superfície da ferramenta, e ao constatar essa presença, as ferramentas foram mergulhadas em uma solução de HNO₃ (ácido nítrico) por 48h para fins de limpeza.

Além de medir o desgaste da ferramenta, foram feitas medições das rugosidades superficiais do material usinado. Essas medições foram realizadas usando-se um rugosímetro Mitutoyo modelo Surftest SJ-201, com um filtro (*cut-off*) de 0,8 mm. As medições foram realizadas em três diferentes regiões da peça: no começo (a 30 mm de distância da extremidade da contra-ponta), no centro da peça, e a 30 mm da extremidade final de usinagem. Três medições foram realizadas em cada região (girando a peça presa na castanha do torno, a cada 120°), e a média das três medidas representa a rugosidade superficial da superfície usinada em cada região. Quando um teste completo excedia cinco passadas, a medição da rugosidade, assim como a medição do desgaste, era feita a cada três ou cinco passadas. Isto permitiu levantar o comportamento da rugosidade da superfície da peça durante cada teste de vida de ferramenta.



Figura 3.12: Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) HITACHI TM 3000

3.2.7. Ensaios para Medição de Forças de Usinagem

Os ensaios para medição das forças de usinagem foram feitos usando-se um dinamômetro (ou plataforma piezelétrica) fabricado pela Kistler Instrument, modelo 9265-B, com amplificador e condicionador de sinais, também fabricado pela Kistler Instrument, modelo 5019A, uma placa de aquisição de sinais da National Instrument, modelo: NI PCI-6036E e software da National Instrument, Labview 7.6. Uma foto da montagem do dinamômetro no torno é mostrada na figura 3.13. O equipamento é fabricado com garantia de isolamento contra umidade, mas por precaução, foi usado um plástico para evitar a entrada de fluido de corte.

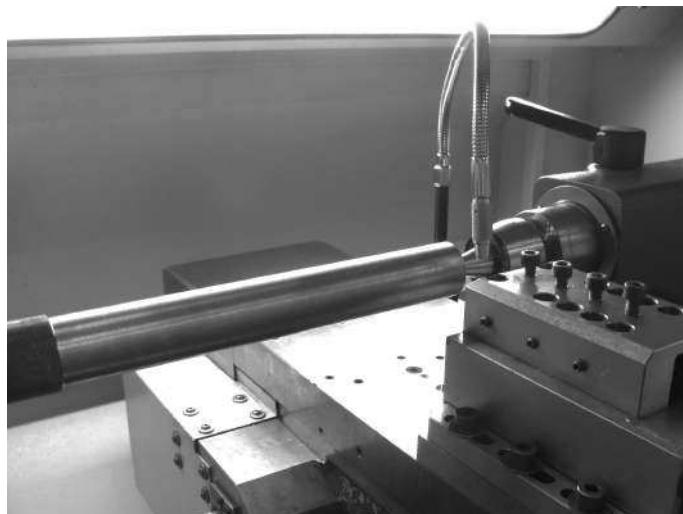


Figura 3.13: Montagem do equipamento de medição das forças de usinagem no torno

Foram medidas as três componentes das forças de usinagem: força de corte, força de avanço e força passiva, durante cinco segundos de usinagem, com taxa de aquisição de 1000 pontos por segundo, e os valores médios dessas componentes foram plotados em gráficos para verificação e avaliação de seu comportamento. Para a realização desses testes, variou-se os parâmetros velocidade de corte (v_c) e avanço da ferramenta (f) durante o torneamento usando-se os três fluidos de corte em diferentes concentrações (3%, 7% e 10%), e na condição a seco. A tabela 3.4 contém os valores

utilizados dos parâmetros de corte. A figura 3.14 contém uma foto de um dos testes de medição da força de usinagem, com aplicação do fluido de corte C (sintético de base vegetal), na concentração de 3%.

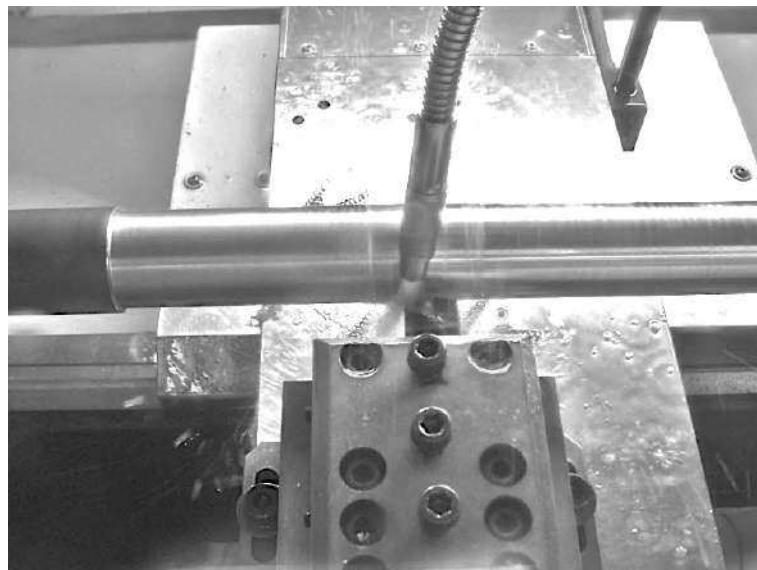


Figura 3.14: Aplicação do fluido de corte durante um dos experimentos

Tabela 3.4. Valores dos parâmetros de corte para os testes de força

3.3.a. Variação de v_c

v_c	f	ap
10		
20		
30		
40		
50		
60		
70		
80	0,2	2
90		
100		
150		
200		
250		
300		
350		

3.3.b. Variação de f

v_c	f	ap
	0,05	
	0,10	
	0,15	
	0,20	
150	0,25	2
	0,30	
	0,35	
	0,40	

3.3.c. Variação das concentrações de fluidos de corte:

Condição lubri-refrigerante	Concentrações
FLUIDO A	
FLUIDO B	3; 7 e 10%
FLUIDO C	
A seco	-

3.2.8. Ensaios de Temperatura de Usinagem

Os ensaios para medição da temperatura de usinagem foram feitos em um torno Diplomat Revolution RV220, fabricado pela DebMaq do Brasil Ltda., usando-se o método do termopar ferramenta-peça, desenvolvido por Fernandes e Machado (1993), e mostrado esquematicamente na figura 3.15.

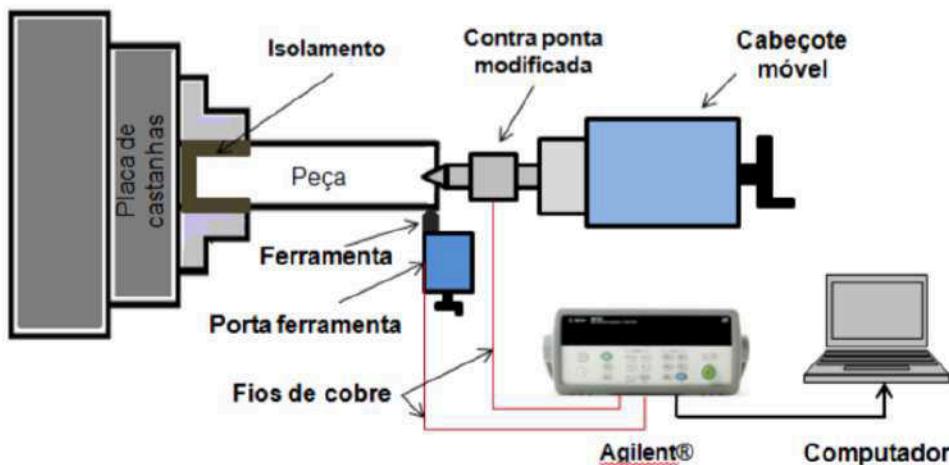


Figura 3.15: Desenho esquemático do sistema para medição de temperatura – método do termopar ferramenta-peça. Fonte: Marques (2015)

Durante a usinagem é gerado um sinal elétrico no contato entre ferramenta e peça que é proporcional ao gradiente entre a temperatura do contato peça/ferramenta/cavaco e a temperatura ambiente. Este sinal é coletado e amplificado usando-se fios de cobre ligados a uma placa de aquisição de dados Agilent, modelo 34901A, e gerenciado através do software Agilent BenchLink Data Logger. Uma curva de calibração entre os dados elétricos (tensão) e a temperatura é necessária. A peça é isolada eletricamente do torno para não haver fuga de tensão, e a contra-ponta utilizada possui um reservatório com mercúrio líquido que objetiva conduzir o sinal elétrico para o amplificador e a placa de aquisição de sinais.

As ferramentas também foram isoladas eletricamente (com borracha e fita isolante) para não acontecer fuga de tensão. Foram usados bits de metal duro da classe P30. Os parâmetros utilizados para os ensaios de temperatura foram $v_c = 50, 100, 150, 200 \text{ e } 250 \text{ m/min}$, $f = 0,2 \text{ mm/rev}$ e $a_p = 1 \text{ mm}$. Os fluidos de corte A, B e C foram aplicados em forma de jorro, todos na

concentração de 7%, e a usinagem também foi feita sem aplicação de fluidos de corte (a seco).

A calibração do par de materiais da ferramenta e da peça foi feita utilizando um forno do tipo Mufla (o mesmo utilizado para os ensaios de capacidade de refrigeração), uma barra de metal duro da classe P30 (material da ferramenta) e um cavaco longo do mesmo material da peça. Este cavaco foi soldado à ponta da barra de metal duro por uma leve descarga capacitiva, para garantir o contato entre os materiais, e colocado dentro do forno. Com a mudança da temperatura nesse contato, o sinal elétrico gerado é coletado e os valores plotados em um gráfico. A medição foi feita entre 400°C e 900°C, e o sinal era coletado a cada 100°C de incremento e esses valores foram colocados em gráfico, e uma curva de calibração foi gerada. Um esquema da montagem da calibração é vista na figura 3.16.

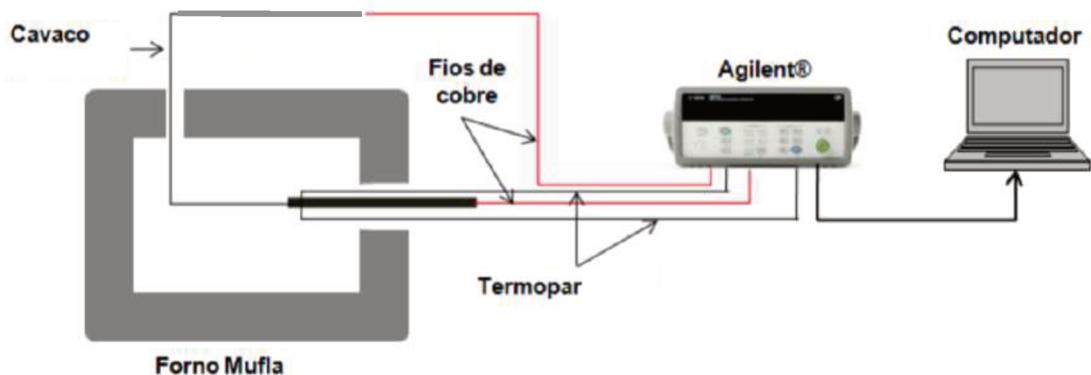


Figura 3.16: Esquema de montagem do sistema de calibração. Fonte: Adaptado de Marques (2015)

A curva de calibração do par de materiais da ferramenta e da peça (metal duro, classe P30 – Aço ABNT 1050), obtida durante os ensaios, pode ser vista na figura 3.17 a seguir.

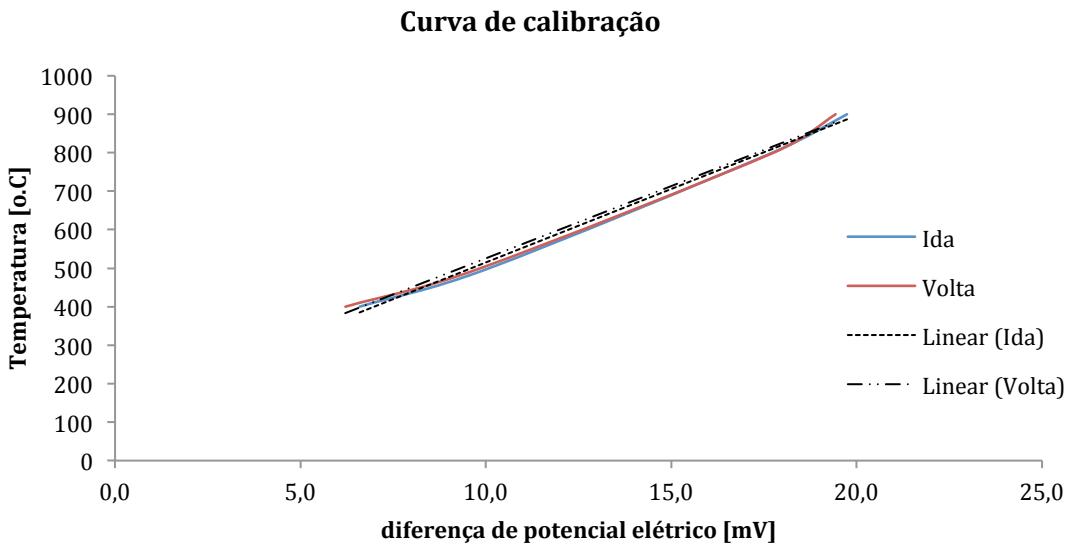


Figura 3.17. Curva de calibração do par de materiais ferramenta/peça (metal duro, classe P30 – Aço ABNT 1050)

A partir dos valores plotados do gráfico, fez-se uma regressão linear e obteve-se a equação média que relaciona a temperatura às diferenças de potencial obtidas:

$$T = 37,86 \cdot x + 141,70 \quad [\text{°C}] \quad \text{Equação 3.1}$$

Nas equações, a variável x representa a diferença de potencial elétrico em mV , e T representa a temperatura média na interface cavaco-ferramenta em $^{\circ}\text{C}$.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Ensaios para caracterização dos fluidos de corte

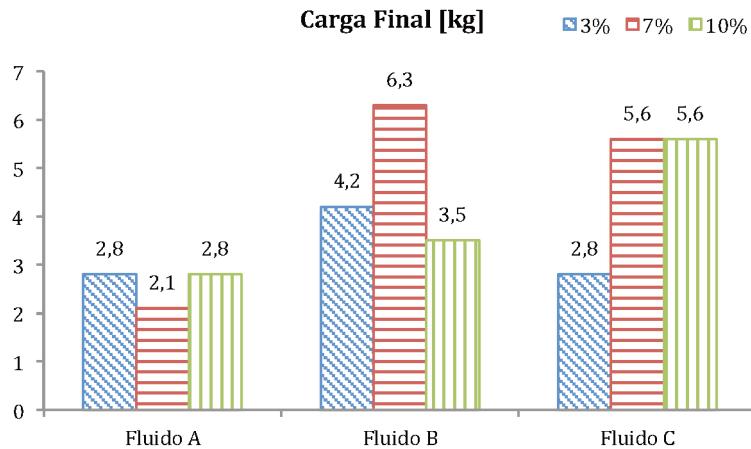
Neste item serão apresentados resultados dos ensaios para caracterização dos fluidos de corte: *reciprocating*, capacidade de refrigeração, molhabilidade, viscosidade e crescimento microbiológico.

4.1.1. *Reciprocating* – Capacidade Lubrificante dos fluidos de corte

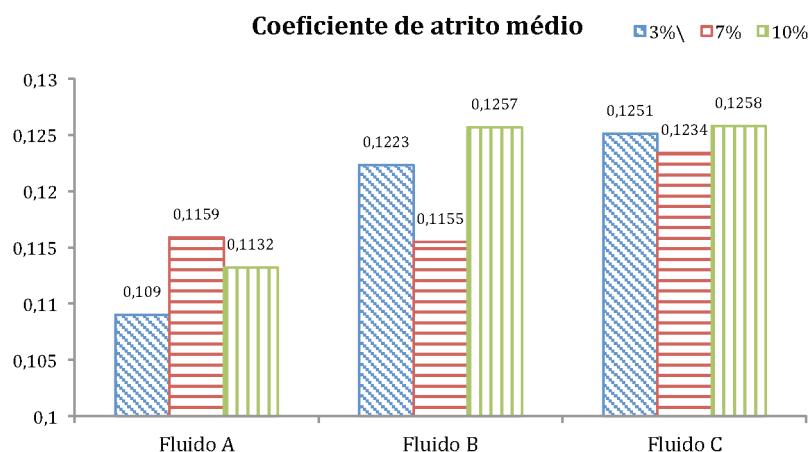
A realização do ensaio de atrito *reciprocating* gerou os resultados mostrados nos gráficos da figura 4.1. É possível observar que alguns fluidos e/ou concentrações de fluidos se mostraram melhores do que outros.

A partir dos resultados obtidos neste ensaio, é possível observar que o fluido de corte B (semissintético de base mineral) na concentração de 7% tem uma maior capacidade lubrificante do que os outros, já que a carga que fez romper o filme e o tempo para que isso acontecesse foram os maiores valores. Além disso, esse fluido, nessa concentração apresentou um pequeno coeficiente de atrito médio, o que significa que a capacidade de lubrificação deste fluido é melhor, pois ele oferece menor resistência ao atrito que acontece entre o material da ferramenta e o material da peça/cavaco. O fluido de corte B possui na sua composição óleos de base mineral, e este resultado era esperado. Essa concentração do fluido B (7%) era a que provavelmente mostraria bons resultados, pois está dentro da faixa de concentração

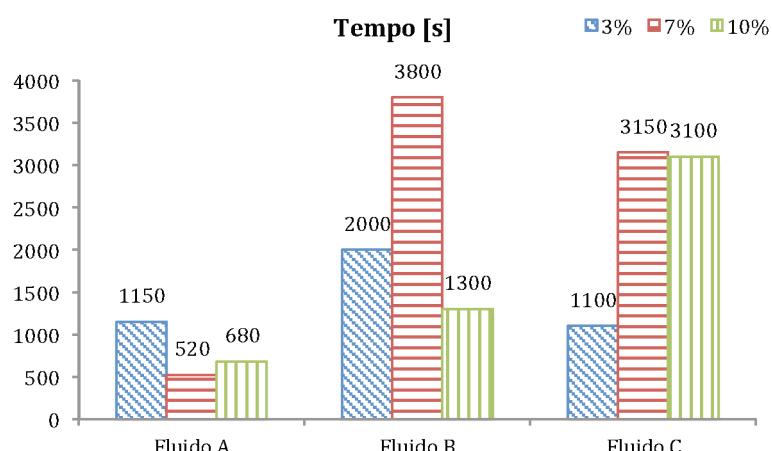
recomendada pelo fabricante (entre 6% e 8%), para que o fluido obtenha o melhor desempenho possível.



(a) Carga máxima até o rompimento do filme lubrificante



(b) Coeficiente de atrito médio



(c) Tempo até o rompimento do filme lubrificante durante o ensaio

Figura 4.1: Comportamento dos fluidos observados no ensaio de atrito *reciprocating*.

Dos fluidos de base vegetal, o fluido sintético C (base vegetal) apresentou uma boa capacidade lubrificante, tanto na concentração de 7% como na de 10%, levando-se em consideração tanto a capacidade máxima de carga suportada como o coeficiente de atrito. Novamente aqui, as concentrações eram esperadas para terem um bom comportamento lubrificante, pois, da mesma maneira que o fluido B, o fabricante recomenda essa faixa de concentração para melhor desempenho (entre 6% e 10%).

O fluido de corte A (emulsionável de base vegetal), foi o que proporcionou os piores desempenhos no ensaio de atrito *reciprocating*. Os tempos para o rompimento do filme lubrificante e as cargas necessárias para que isso acontecesse foram os menores valores observados. Este resultado pode estar relacionado com os ensaios de molhabilidade e de viscosidade (que serão mostrados nos itens 4.1.3 e 4.1.4 deste texto), já que o fluido de corte A apresentou os melhores valores de molhabilidade e os maiores valores de viscosidade medidos. Acontece que a maior viscosidade deveria ser um fator que facilitasse a lubrificação da superfície de contato entre ferramenta e cavaco, mas o fluido de corte A também foi o que mais se espalhou (menores valores dos ângulos de contato, portanto melhor molhabilidade) pela superfície. Esse maior espalhamento é que faz com o que o filme tenha um comportamento menos estável, e se rompa com maior facilidade, no ensaio de atrito, do que os fluidos que se espalham menos na superfície (apresentam maiores ângulos de contato) (OLIVEIRA JÚNIOR, 2013).

4.1.2. Ensaios para verificação da capacidade refrigerante dos fluidos

Na figura 4.2 é possível verificar o comportamento dos fluidos de corte no resfriamento do corpo de prova usado para os ensaios, até o corpo de prova atingir a temperatura de 40°C, e pode-se visualizar que o fluido de corte C na concentração de 10% foi o que demonstrou uma pior capacidade de refrigeração, já que o tempo para que a peça atingisse essa temperatura foi maior que o tempo dos demais fluidos de corte. A tabela 4.1 contém os valores

dos tempos totais para o resfriamento até a temperatura de 40°C, como mostrado nos gráficos das figuras 4.2 e 4.3. A temperatura ambiente durante os ensaios estava em torno de 28°C.

Tabela 4.1. Tempos de resfriamento até 40°C

Concentração	3%	7%	10%
Fluido de Corte	Tempo (horas:minutos:segundos)		
A	0:00:34	0:00:35	0:00:40
B	0:00:35	0:00:31	0:00:32
C	0:00:30	0:00:41	0:00:51
Ar Ambiente	x	0:05:40	x

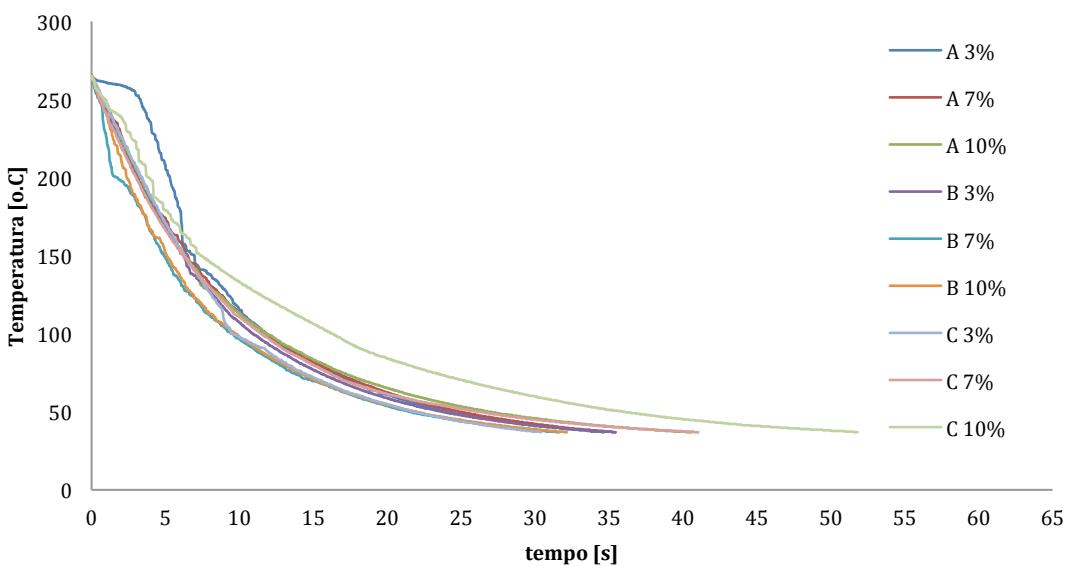


Figura 4.2: Curva de resfriamento do corpo de prova quando utilizando os fluidos de corte

Nos gráficos da figura 4.3 observa-se as curvas de cada concentração usada dos fluidos de corte separadamente. É possível notar que a maior diferença entre essas curvas acontece quando da comparação dos fluidos de corte na concentração de 10%. Esta concentração possui mais óleo em sua composição, o que caracteriza fluidos com uma maior capacidade de lubrificação e menores capacidades de refrigeração. Essa é a explicação,

inclusive, para o fato dos fluidos nessa concentração apresentarem maiores tempos de resfriamento do que nas demais concentrações estudadas. Dentre todos eles, o fluido de corte C (sintético de base vegetal) na concentração de 10% foi o que demonstrou a pior capacidade refrigerante, o que foi possível observar também quando do cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção (Tabela 4.2).

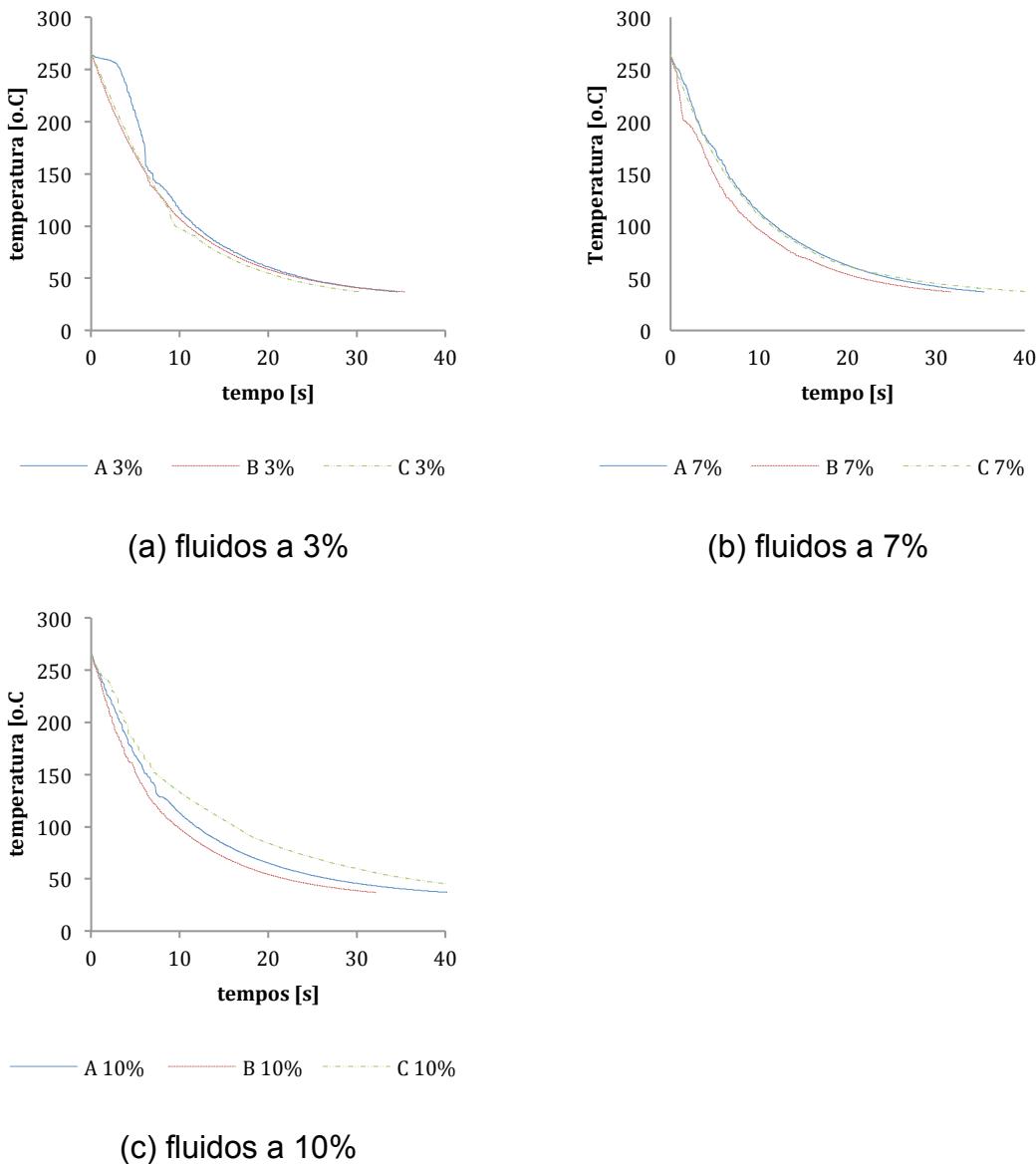


Figura 4.3: Curvas de resfriamento dos fluidos em cada concentração utilizada

Também é possível notar que o fluido de corte C na concentração de 3% foi o que resfriou o corpo de prova mais rapidamente, o que pode ser confirmado pela tabela 4.1 e pelo gráfico da figura 4.4, que mostra os tempos de

resfriamento dos fluidos de corte e pelo gráfico da curva de resfriamento dos fluidos na concentração de 3% (figura 4.3a). Lembrando que o fluido de corte C é um fluido sintético de base éster (vegetal), e que possui mais água na sua composição, assim, este resultado mostrou-se compatível com o que se esperava no comportamento desse fluido de corte.

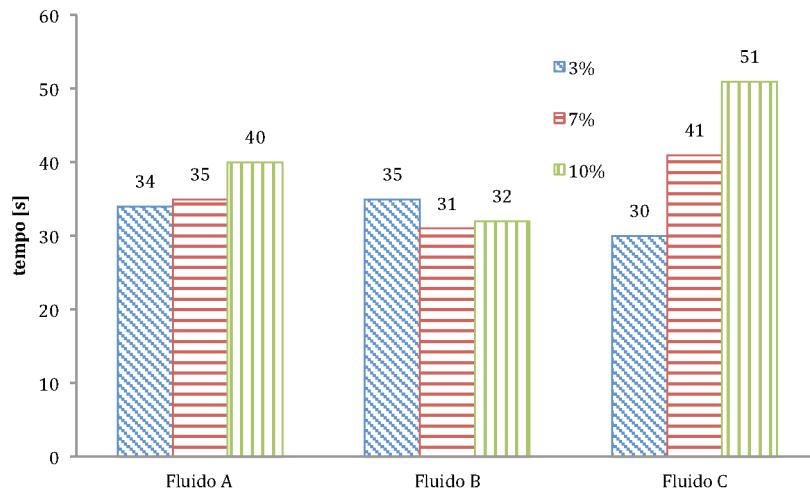


Figura 4.4: Tempo do resfriamento de cada fluido de corte no ensaio para verificação da capacidade de refrigeração

As diferenças mais evidentes nos resultados dos tempos de resfriamento acontecem na utilização do fluido de corte C. Ao aumentar a sua concentração de 3% para 10%, o tempo de resfriamento fica 70% maior, o que significa que sua capacidade de refrigeração é melhor quando o fluido é usado em baixas concentrações, ou seja, quando a mistura é mais rica em água do que em óleo. Entretanto, com o fluido de corte B (semissintético de base mineral) aconteceu um comportamento diferente: quando a sua concentração estava a 7%, o fluido de corte apresentou uma melhor capacidade refrigerante do que nas outras concentrações. Quando usado na concentração de 3%, por exemplo, o tempo foi 13% maior para resfriar a peça. Este comportamento pode estar relacionado com os resultados encontrados nos ensaios de molhabilidade (apresentados no item 4.1.3), onde o fluido de corte B na concentração de 3% apresentou o maior ângulo de contato, significando que esse fluido possui maior dificuldade em se espalhar sobre o material da peça, e contribuindo então para os maiores tempos de resfriamento observados.

É possível também calcular o coeficiente de convecção h , através dos dados coletados no ensaio de resfriamento, sendo este um outro parâmetro para comparar a capacidade refrigerante dos fluidos de corte usados. Para o cálculo do coeficiente de convecção h , utiliza-se a seguinte expressão:

$$h = Bi \cdot \frac{2k}{r}, \text{ onde:} \quad \text{Equação 4.1}$$

$h = \text{coeficiente de troca de calor por convecção } [W/m^2K];$

$Bi = \text{número adimensional de Biot};$

$k = \text{condutividade térmica do aço } (k = 17,7 W/mK);$

$r = \text{raio interno do corpo de prova } (r = 1,35cm);$

Para o cálculo do número adimensional de Biot, utiliza-se a seguinte expressão:

$$\frac{\theta_t}{\theta_i} = e^{\frac{-4 \cdot Bi \cdot \alpha \cdot t}{r^2}}, \text{ onde:} \quad \text{Equação 4.2}$$

$\theta_t = T_t - T_\infty \text{ e } \theta_i = T_i - T_\infty;$

$T_t = \text{temperatura final do corpo } (T_t = 40^\circ C);$

$T_i = \text{temperatura no início da aquisição } (T_i = 262^\circ C);$

$T_\infty = \text{temperatura ambiente } (T_\infty = 28^\circ C);$

$\alpha = \text{difusividade térmica do material do corpo de prova } (\alpha$

$$= 1,36 \cdot 10^{-5} m^2/s);$$

$t = \text{tempo total de aquisição}.$

De acordo com Incropera e de Witt (2008), quando o número adimensional de Biot (Bi) é menor do que 1 ($Bi < 1$), o gradiente de temperatura no sólido é pequeno, o que significa que a maior diferença de temperaturas é entre a peça e o fluido de corte. Na tabela 4.2 apresenta-se os resultados encontrados para o número adimensional de Biot e o coeficiente de troca de calor por convecção (h) para cada condição testada.

Tabela 4.2. Valores calculados de Bi e h

Condição refrigerante	$T_t [K]$	$T_\infty [K]$	$T_i [K]$	$t [s]$	Bi	$h [W/m^2 K]$
Fluido A 3%	310,15	301,15	537,15	34	0,322	844,03
Fluido A 7%	310,15	301,15	537,15	35	0,313	819,91
Fluido A 10%	310,15	301,15	537,15	40	0,274	717,42
Fluido B 3%	310,15	301,15	537,15	35	0,313	819,91
Fluido B 7%	310,15	301,15	537,15	31	0,353	925,71
Fluido B 10%	310,15	301,15	537,15	32	0,342	896,78
Fluido C 3%	310,15	301,15	537,15	30	0,365	956,56
Fluido C 7%	310,15	301,15	537,15	41	0,267	699,92
Fluido C 10%	310,15	301,15	537,15	51	0,215	562,68
A seco	310,15	301,15	537,15	340	0,032	84,40

O gráfico na figura 4.5 mostra os coeficientes de troca de calor por convecção encontrados através do ensaio de resfriamento realizado. É possível observar que, quanto maior o valor de h , maior é a capacidade de troca de calor. Isso é visível no gráfico: o valor do h no ensaio a seco (h do ar) foi o menor valor calculado.

Dos fluidos de corte analisados, o fluido de corte C na concentração de 3% foi o que se mostrou com a melhor capacidade refrigerante, já que apresentou o maior coeficiente de troca de calor por convecção. O fluido de corte C é um fluido sintético de base vegetal. Como a concentração de 3% é baixa, ele possui maior quantidade de água em sua composição, e isso é uma das explicações para esse desempenho. É interessante também observar que este fluido de corte não apresentou um bom desempenho no ensaio de atrito *reciprocating*, sendo um dos fluidos que o filme se rompeu mais rapidamente e com uma das menores cargas aplicadas. Este é um resultado interessante, pois significa que, esse fluido, nessa concentração (3%), mostrou-se com uma boa capacidade refrigerante e uma capacidade lubrificante ruim.

Além desse resultado, o mesmo fluido de corte C, agora na concentração de 10%, obteve o menor valor de h , mostrando-se o fluido com menor capacidade de troca de calor. Isso pode ser devido ao fato da maior quantidade de óleo vegetal na mistura. Esses comportamentos também foram observados nas curvas de resfriamento apresentadas anteriormente.

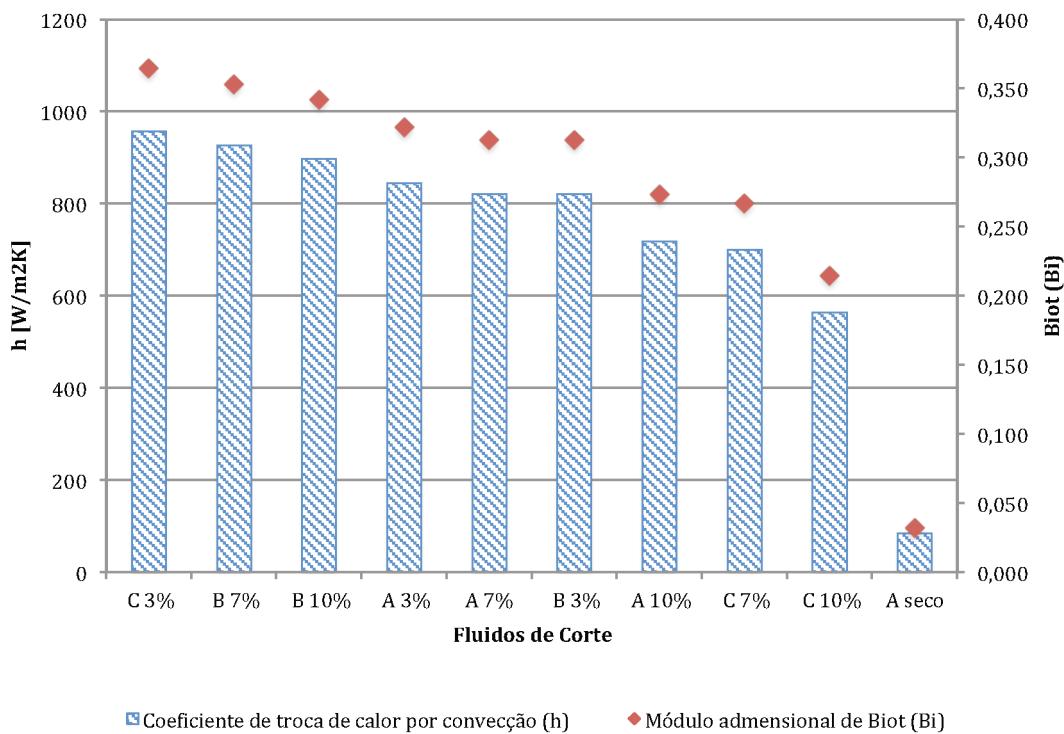
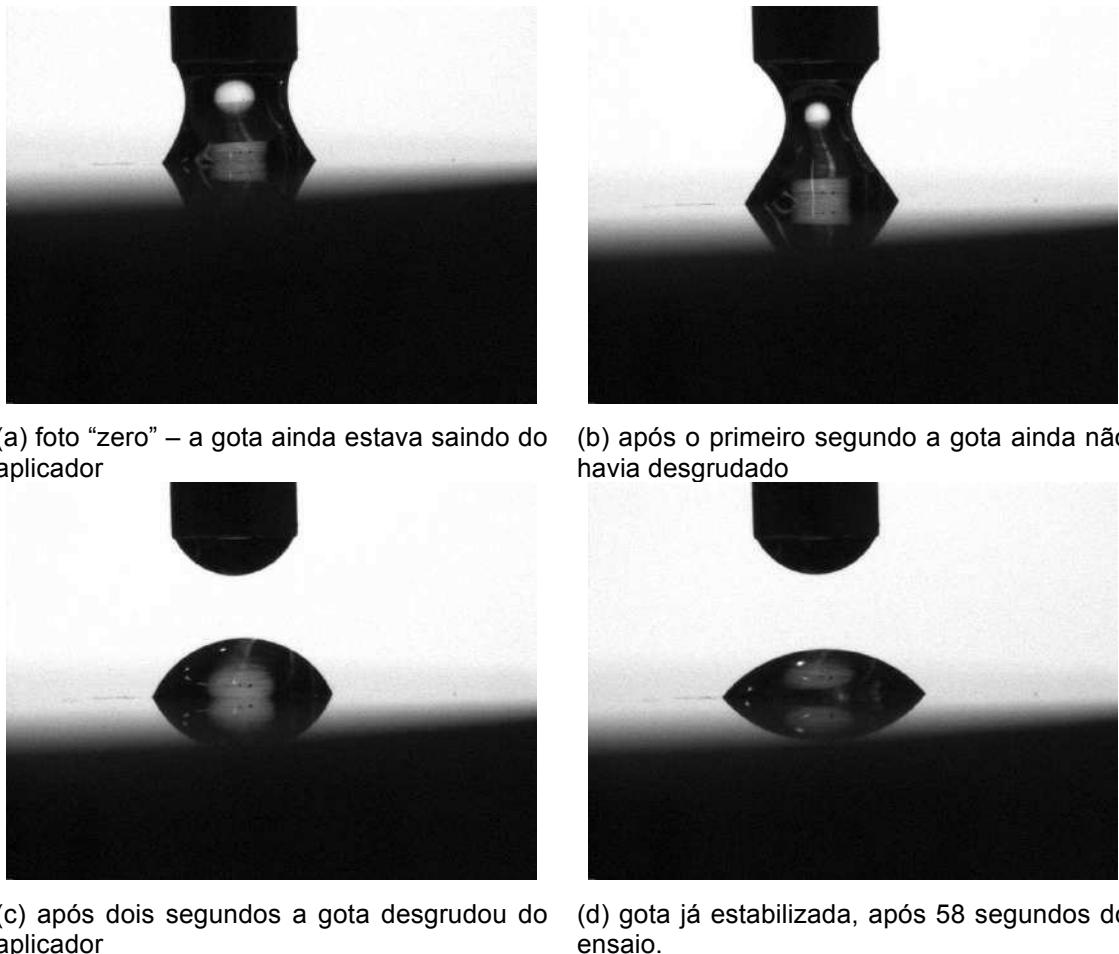


Figura 4.5: Coeficientes de troca de calor (h) e número de Biot (Bi) encontrados através do ensaio de resfriamento, em ordem decrescente de valores

Esses comportamentos também foram observados nas curvas de resfriamento apresentadas anteriormente (figuras 4.3 e 4.4).

4.1.3. Ensaios de molhabilidade

A molhabilidade é a capacidade de “espalhamento” do fluido quando entra em contato com o material, como já foi explicado anteriormente neste trabalho. A figura 4.6 contém as fotos de uma das gotas medidas no ensaio, onde as três primeiras fotos são do começo, até a gota se desgrudar da pipeta, e a quarta foto é a gota estabilizada. As gotas tiveram seus ângulos de contato medidos por 60 segundos, dos dois lados (esquerdo e direito) de cada gota. A figura 4.7 contém fotos dos ângulos de contato de cada fluido de corte após 60 segundos de ensaio.



(a) foto “zero” – a gota ainda estava saindo do aplicador
 (b) após o primeiro segundo a gota ainda não havia desgrudado
 (c) após dois segundos a gota desgrudou do aplicador
 (d) gota já estabilizada, após 58 segundos do ensaio.

Figura 4.6: Fotos durante o ensaio de molhabilidade. O ângulo era medido pelo software, que também tirava uma foto a cada segundo de ensaio, durante 60 segundos. As gotas das fotos são do fluido de corte B na concentração de 3%, que foi o fluido que apresentou maior ângulo de contato após sua estabilização, nos trinta segundos finais do ensaio.

Pelas fotos da figura 4.7 é possível observar a molhabilidade de cada fluido. Os fluidos na concentração de 3% foram os que apresentaram maiores ângulos de contato, e isso significa que eles se espalharam menos na superfície do material testado. Também é possível observar, por meio de comparação entre as fotos, que o fluido de corte A (emulsionável de base vegetal) na concentração de 10% foi o que mais se espalhou na superfície do material. Isso é comprovado pelos resultados das medições dos ângulos de contato, que podem ser conferidos nos gráficos das figuras 4.9, 4.10 e 4.11. Os gráficos da figura 4.9 contém os valores dos ângulos do contato em função do tempo.

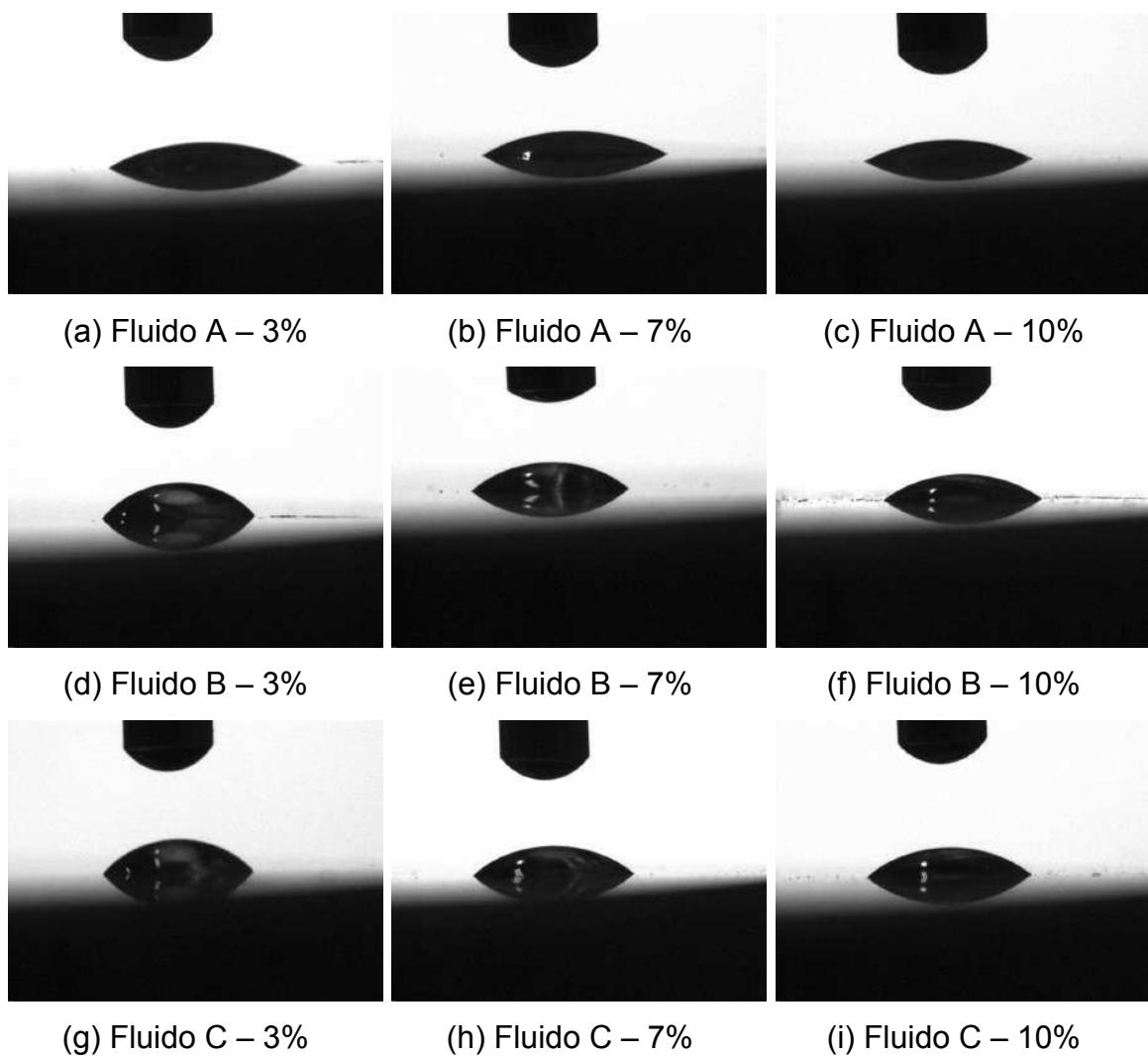


Figura 4.7: Fotos das gotas de cada fluido após 60 segundos de ensaio (gota totalmente estabilizada na superfície)

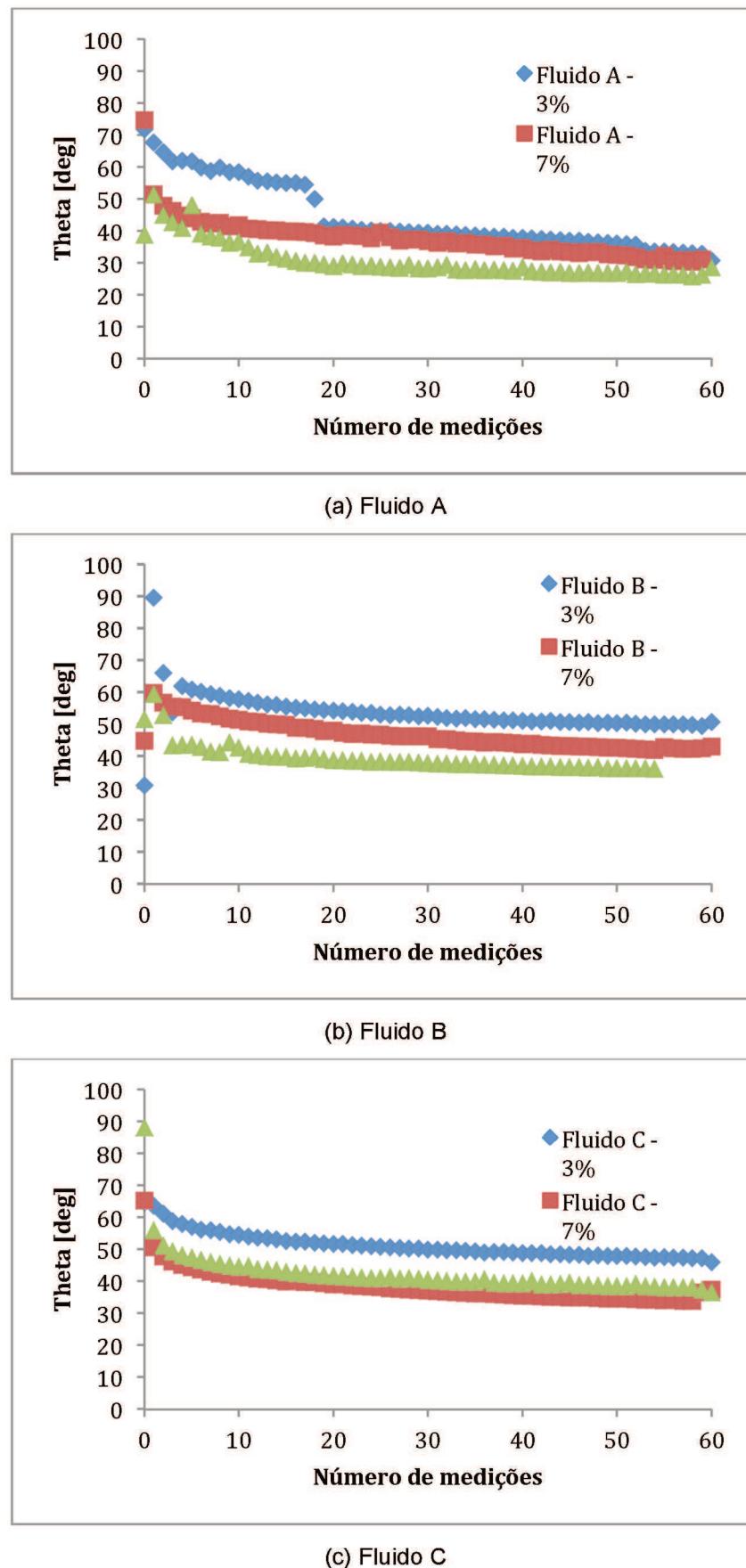


Figura 4.8: Evolução do ângulo de contato de cada fluido, medido ao longo de 60 segundos

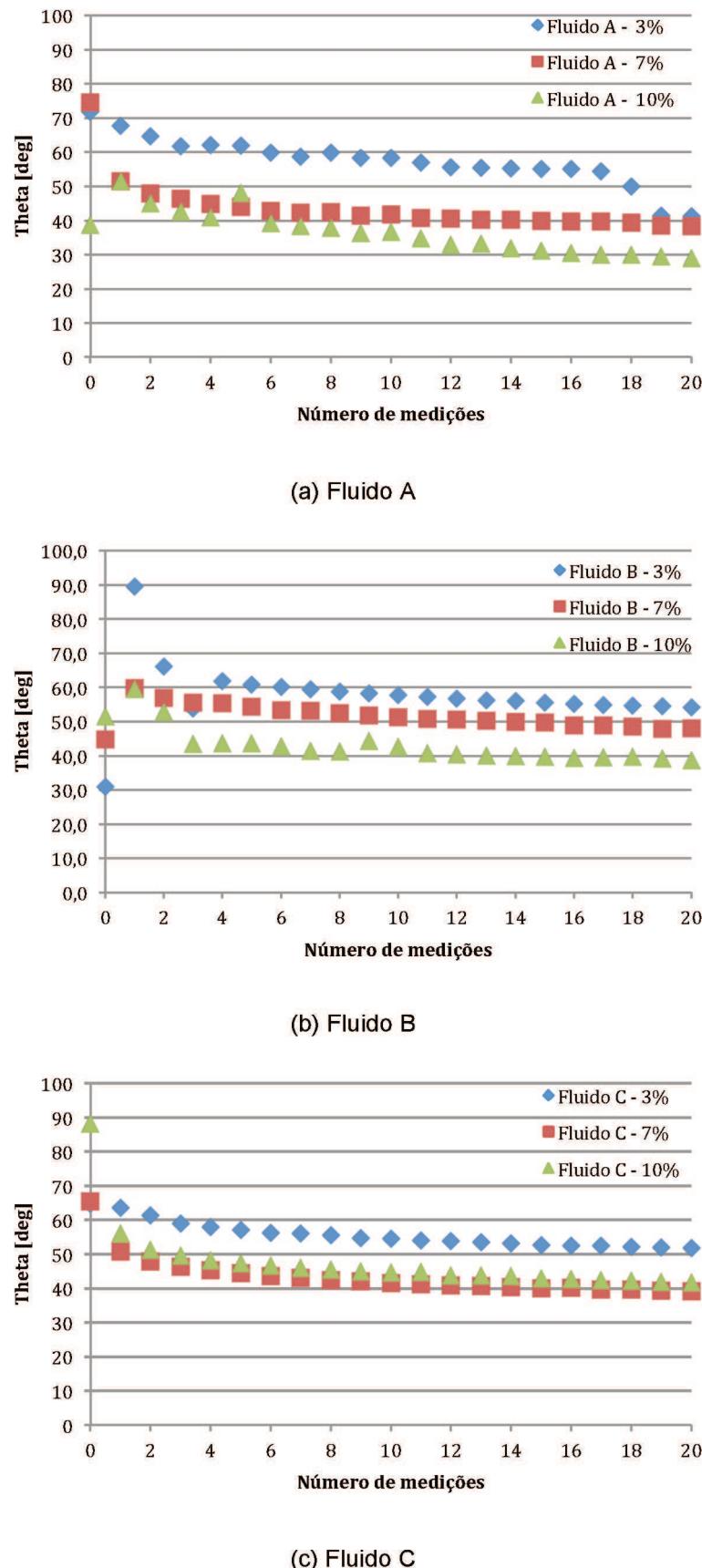


Figura 4.9: Estabilização da gota sobre a superfície do aço ABNT 1050 nos primeiros 20 segundos de ensaio

A determinação desses ângulos de contato fornece detalhes sobre a capacidade de espalhamento desses fluidos, o que é uma importante característica, que influencia positivamente em suas propriedades lubrificantes e anticorrosiva (FINZI, 2017). Apesar de o molhamento inicial, nos primeiros 2 a 3 segundos ser o que melhor define a característica da gota ao atingir o material da peça/ferramenta, uma tendência de estabilização no ângulo de contato da gota foi observada em todos os fluidos de corte testados após aproximadamente 20 segundos do ensaio. Esses resultados são mostrados na figura 4.9.

Uma redução no ângulo de contato da gota com a superfície do corpo de prova, ou seja, entre a fase líquida (fluido de corte) e a fase sólida (material do corpo de prova), representa melhora na molhabilidade. Apesar dos diferentes valores nos ângulos de contato obtidos para os três fluidos de corte, o comportamento das curvas que correspondem ao espalhamento da gota na superfície do substrato foi semelhante para todas as condições testadas.

Os valores do ângulo de contato dos instantes finais podem também ser usados para indicar a capacidade de molhabilidade dos fluidos de corte, sendo que o menor valor indica maior (melhor) molhabilidade, ou seja, quanto menor o ângulo de contato, mais espalhado fica o líquido na superfície. Os menores ângulos de contato obtidos, considerando-se a média de ângulos determinados nos 30 segundos finais do ensaio, para os três fluidos, nas três concentrações testadas, é mostrado na figura 4.11.

O fluido que mais “molhou” a superfície do aço utilizado foi o fluido A na concentração de 10%. Isso pode ser explicado pelo fato deste fluido ter óleos vegetais em sua composição, que formam moléculas polares e se alinham com a superfície do metal, e possuem maior compatibilidade com o material da peça (WOODS, 2005). Também foi observado uma capacidade de refrigeração ruim desse fluido de corte, apresentando ele um dos menores coeficientes de troca de calor por convecção calculados a partir do ensaio de verificação da capacidade refrigerante (figura 4.6), e um dos menores coeficientes de atrito medidos durante o ensaio de atrito *reciprocating*. Isso comprova que uma maior molhabilidade do fluido de corte torna melhor a sua capacidade de lubrificação e pior a sua propriedade refrigerante (que são suas principais funções).

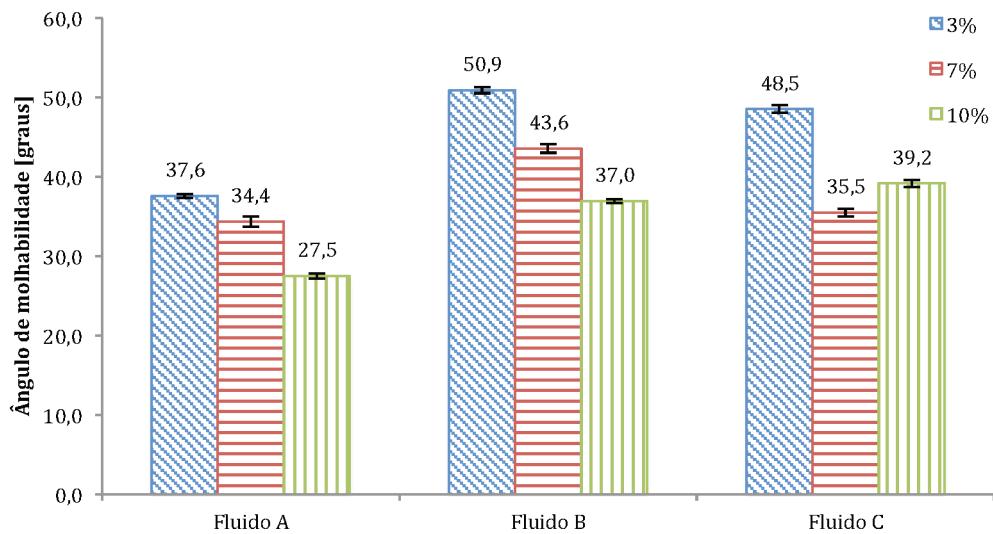


Figura 4.10: Molhabilidade dos fluidos de corte utilizados

O aumento da concentração dos fluidos de corte tem o efeito de aumentar a molhabilidade, ou seja, diminuir o ângulo de contato. Apesar disso, esse comportamento não foi observado no ensaio com o fluido de corte C, que é um fluido sintético de base vegetal. Os fluidos que se espalharam menos foram o B e o C, ambos na concentração de 3%. A consequência disso na usinagem é que, com menor contato entre o material da peça e o fluido de corte, a capacidade de lubrificação e de refrigeração destes fluidos pode ser comprometida. Nos ensaios para verificação dessas capacidades, foi possível observar um comportamento parecido com esses dois fluidos de corte. No ensaio de refrigeração, o maior valor do coeficiente de troca de calor observado foi o do fluido de corte C na concentração de 3%. Isso configura uma capacidade refrigerante melhor do que a dos outros fluidos e concentrações avaliados, mesmo tendo sido sua molhabilidade um dos menores valores. Os valores dos coeficientes de atrito obtidos no ensaio *reciprocating* também não foram baixos, apesar de não terem sido os maiores valores medidos. Isso significa que a molhabilidade também influenciou no comportamento da capacidade lubrificante dos fluidos de corte testados.

4.1.4. Ensaios de Viscosidade

Um dos parâmetros indicados para monitorar a qualidade do fluido de corte em uso é a viscosidade. A viscosidade é uma resistência que o fluido apresenta ao escoamento. Essa resistência é definida como o atrito interno que é resultante do movimento de uma camada de fluido em relação à outra.

Em geral, dois tipos de viscosidade são diferenciados: viscosidade cinemática e dinâmica. A viscosidade dinâmica dependente da temperatura e é definida como a relação entre a tensão de cisalhamento que atua sobre o fluido e a taxa de cisalhamento. A viscosidade cinemática é definida como a razão entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido e é um parâmetro muito utilizado pelos fabricantes de fluidos de corte para caracterizá-los (FINZI, 2017).

Um fluido miscível em água, utilizado em usinagem terá uma viscosidade próxima da viscosidade da água, uma vez que a água é o seu componente principal. Os resultados obtidos na medição da viscosidade dos fluidos estão mostrados na tabela 4.3 e na figura 4.11.

Tabela 4.3. Valores obtidos no ensaio de viscosidade dinâmica, viscosidade cinemática e massa específica

Fluido	μ (mPa.s)	ν ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	ρ (g.cm $^{-3}$)
A 3%	1,1343	1,1405	0,9946
A 7%	3,3715	3,3993	0,9919
A 10%	6,4638	6,5384	0,9886
B 3%	0,8147	0,8167	0,9976
B 7%	0,8950	0,8954	0,9996
B 10%	1,0356	1,0331	1,0024
C 3%	0,8288	0,8297	0,9989
C 7%	0,9599	0,9557	1,0044
C 10%	1,0905	1,1078	1,0094

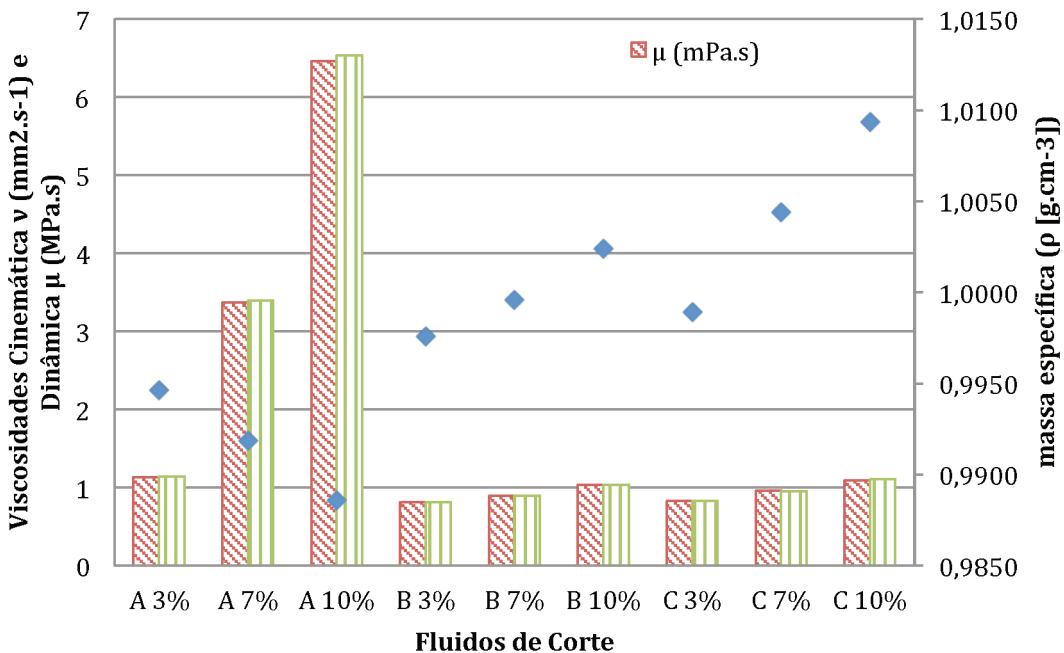


Figura 4.11: Viscosidade dos fluidos de corte utilizados

À primeira vista, parece que os óleos mais viscosos teriam um melhor desempenho, uma vez que os filmes gerados na interface seriam mais espessos e haveria uma melhor separação das duas superfícies em contato. Isto entretanto, nem sempre é o caso, uma vez que os óleos mais viscosos são mais resistentes ao cisalhamento e, consequentemente, as perdas de energia são mais elevadas e é gerado mais calor, resultando num aumento substancial da temperatura das superfícies de contato, o que pode levar à falha do componente (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2006).

A partir destes resultados, pode-se observar que o fluido A, em qualquer das concentrações utilizadas, apresentou os maiores valores de viscosidade tanto cinemática quanto dinâmica. Este resultado, comparando-se com o ensaio *reciprocating*, demonstra que apresentar maiores valores de viscosidade não significa necessariamente que o fluido apresentará melhor capacidade lubrificante. Comparando-se os dois ensaios, o fluido de corte que apresentou melhor capacidade lubrificante no ensaio de atrito por deslizamento *reciprocating* (fluido B na concentração de 7%) possui viscosidade próxima da viscosidade da água. Já na comparação com o ensaio de molhabilidade, os resultados são diferentes: o fluido que apresenta maiores viscosidades (fluido

A) foi também o fluido que apresentou os menores valores do ângulo de contato com a superfície, ou seja, a capacidade de molhamento deste fluido é maior, sendo mais fácil o seu espalhamento na superfície do material da ferramenta (e da peça), o que deveria ser um facilitador da capacidade lubrificante do fluido.

Dentre as duas viscosidades medidas a que melhor define o comportamento do fluido de corte no sistema no qual circula é a cinemática, escolhida inclusive por fabricantes de fluidos para usinagem para caracterizar a viscosidade de seus fluidos em temperatura de 40º.C. Um ranqueamento dos fluidos de corte investigados a partir desse parâmetro é mostrado na figura 4.12. Como já observado, o fluido de corte que apresentou os maiores valores de viscosidade foi o fluido A (emulsionável de base vegetal) nas três concentrações testadas, sendo que quanto maior a concentração, maior é a viscosidade. Na concentração de 10% a viscosidade é em torno de 6 vezes superior à viscosidade na concentração de 3%.

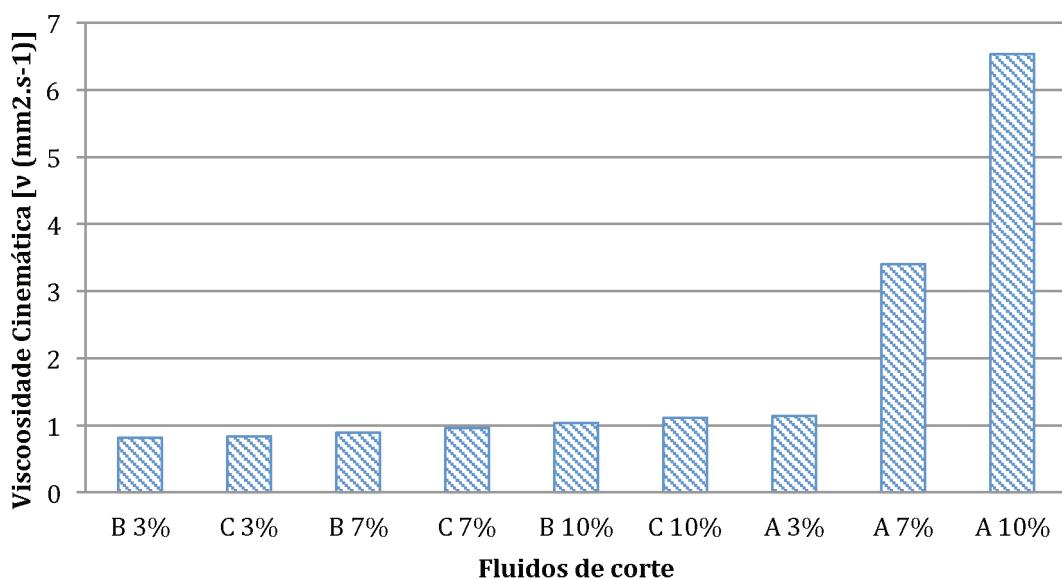


Figura 4.12: Ranqueamento dos fluidos de corte a partir da viscosidade cinemática, em todas as concentrações utilizadas

4.1.5. Curva de crescimento microbiológico nos fluidos de corte após contaminação “*in vitro*”

No ensaio de envelhecimento dos fluidos por contaminação microbiológica, uma carga de microrganismos era colocada em cada fluido de corte (na concentração de 7%) e deixada por 51 dias para estes microrganismos crescerem e multiplicarem. Após este tempo, o crescimento dos microrganismos era avaliado e algumas propriedades dos fluidos contaminados foram medidas para comparar se essa contaminação realmente causa alguma alteração no desempenho dos fluidos de corte. A figura 4.13 a seguir contém o gráfico com a evolução do crescimento microbiano no período avaliado.

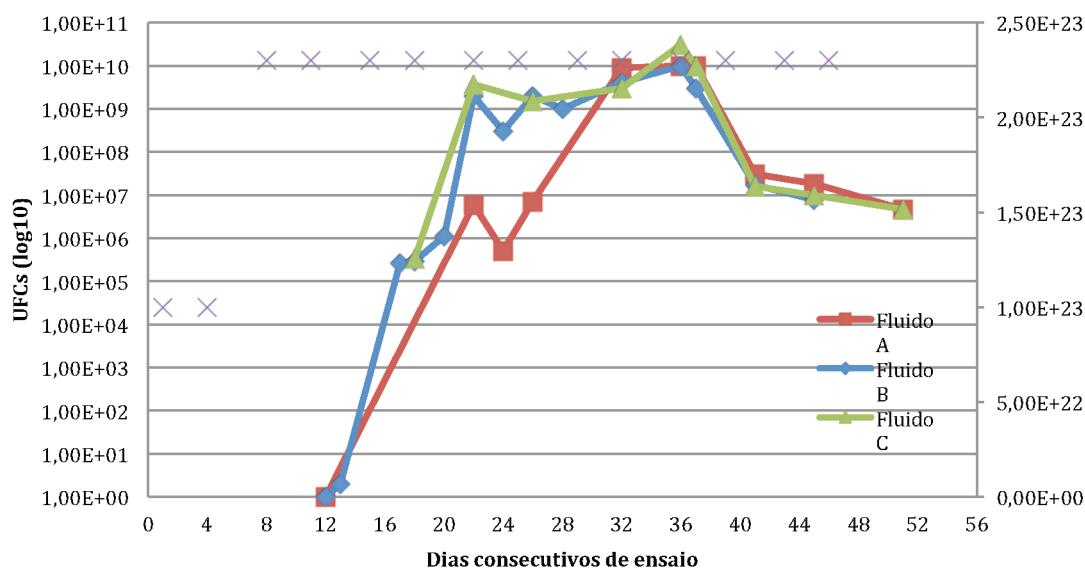


Figura 4.13: Curva de crescimento microbiano e carga microbiológica inoculada no período de 51 dias para os três fluidos investigados na concentração de 7%

Todos os fluidos se mostraram resistentes à contaminação nos primeiros 10 dias de ensaio. O primeiro fluido de corte que se mostrou contaminado foi o fluido de corte B (semissintético de base mineral), que apresentou um crescimento de 10^2 UFC/mL (unidades formadoras de colônias por mililitro) no 12º dia de experimento. O fluido de corte C (sintético de base vegetal) foi o que

mais demorou para que os microrganismos crescessem, o que aconteceu no 18º dia.

Em aproximadamente 34 dias (32 dias para o fluido de corte A e 36 dias para os fluidos de corte B e C), a contaminação dos três fluidos atingiu os valores máximos, e após esse tempo, começaram a cair, obedecendo a curva de crescimento bacteriano que consta na literatura (TORTORA, FUNKE e CASE, 2012).

Após a contaminação, alguns ensaios foram feitos com os fluidos de corte contaminados para verificar se houve alguma modificação nas propriedades dos fluidos de corte. Na figura 4.14 pode-se observar o que aconteceu com a viscosidade após o ensaio de contaminação.

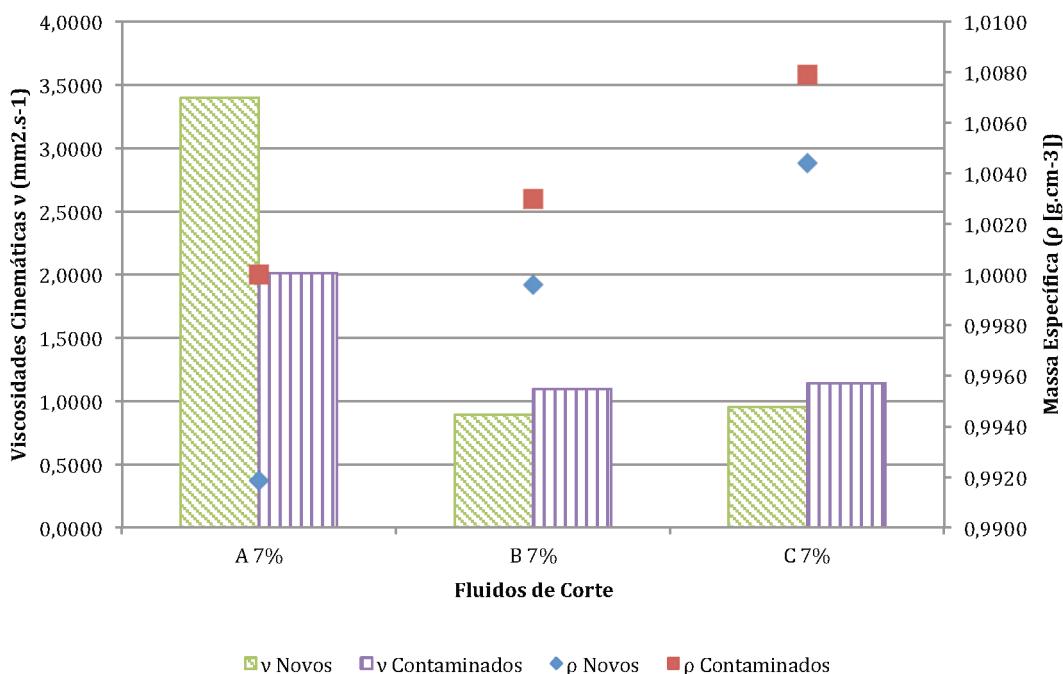


Figura 4.14: Viscosidades cinemática ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) e massa específica ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) dos fluidos de corte após o ensaio de contaminação

Pode-se perceber que a maior diferença nos valores das viscosidades e na massa específica foram encontradas no fluido A, sendo que houve uma diminuição de aproximadamente 40% do valor da viscosidade do fluido de corte A novo (sem contaminação). Já nos fluidos de corte B e C houve um pequeno aumento nos valores dessas viscosidades, sendo um aumento de 23% na

viscosidade cinemática do fluido B e 20% de aumento na viscosidade cinemática do fluido de corte C. Essas diferenças acontecem por causa do metabolismo dos microrganismos que foram inoculados nos fluidos de corte: ali, pela liberação de subprodutos ácidos e provavelmente pela geração de produtos sulfurados que contaminam o fluido reduzem a sua viscosidade e sua resistência térmica (FINZI, 2017)

4.2. Resultados dos Ensaios de Vida da Ferramenta

Os resultados do tempo de vida das ferramentas quando aplicando os três fluidos de corte e a seco, para as quatro condições de corte utilizadas (Tabela 3.4) estão mostrados nos gráficos da figura 4.15.

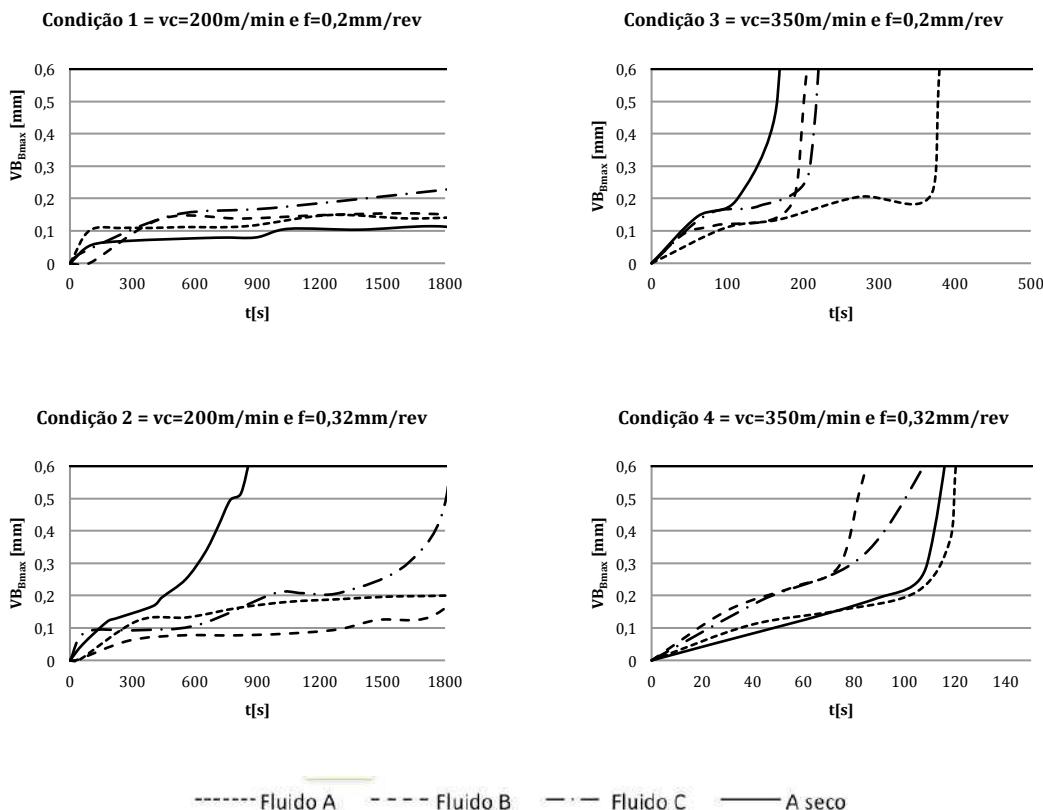


Figura 4.15: Gráficos dos desgastes das ferramentas em função do tempo

Como era esperado, as ferramentas duravam mais tempo quando usinando na primeira condição, que correspondia aos menores valores de velocidade de corte ($200m/min$) e avanço ($0,20\text{ mm/rot}$), o que foi observado

utilizando todas as condições lubri-refrigerantes. Nas condições onde a velocidade de corte era menor, foi avaliado o desgaste das ferramentas quando o tempo usinagem chegava a 30 minutos (critério de parada). Através dessa análise, observa-se que durante a usinagem com o fluido de corte C (sintético de base vegetal), o desgaste foi maior do que o desgaste obtido após 30 minutos (1800 s) de usinagem com as outras condições lubri-refrigerantes. Observou-se também que o desgaste na condição a seco foi menor que o desgaste durante o uso de qualquer dos fluidos, o que aconteceu pelo fato do ensaio não ter sido levado até o fim de vida da ferramenta.

Quando a usinagem foi feita na condição 2, com $v_c = 200m/min$ e $f = 0,32 mm/rot$, a ferramenta teve um desgaste mais acelerado quando a peça foi usinada sem a utilização de fluido de corte (a seco), e chegou ao fim de vida antes dos 30 minutos estipulados como critério de comparação. Também foi observado o comportamento do desgaste da ferramenta de corte durante a usinagem usando o fluido sintético C, que foi um desgaste maior do que o desgaste durante a utilização dos outros dois fluidos de corte. Também é possível observar que o maior avanço da ferramenta acelera o desgaste, já que essa é uma das variáveis mais influentes no desgaste das ferramentas.

Nas condições mais severas, com a velocidade de corte de $350m/min$, o máximo tempo de usinagem foi de aproximadamente 7 minutos, quando utilizando o menor valor do avanço, de $0,20 mm/rot$ (condição 3). Em todos os ensaios realizados nas condições mais severas as ferramentas sofreram avaria após ultrapassarem o valor máximo do desgaste ($VB_{B_{max}} \geq 0,6 mm$). Na condição de corte 4, onde $v_c = 350m/min$ e $f = 0,32 mm/rot$, os tempos de usinagem foram os menores observados, sendo o máximo de 2 minutos aproximadamente. Nessa condição também aconteceu avaria nas ferramentas após o desgaste ter alcançado o valor máximo.

O gráfico da figura 4.16 contém as comparações dos tempos de vida das ferramentas entre as condições lubri-refrigerantes utilizadas, para o critério de final de vida da ferramenta estipulado ($VB_{B_{max}} = 0,6 mm$). Observa-se que ao levar o teste até o fim de vida para este critério, a condição a seco, geralmente, foi a pior condição lubri-refrigerante testada. Exceções ocorreram na condição 1, quando o fluido C (sintético de base vegetal) apresentou vida mais curta, e

na condição 4, quando o fluido B (semi-sintético de base mineral) também apresentou vida ligeiramente mais curta. Quando isso ocorreu, o lascamento foi o principal problema causado com os fluidos de corte.

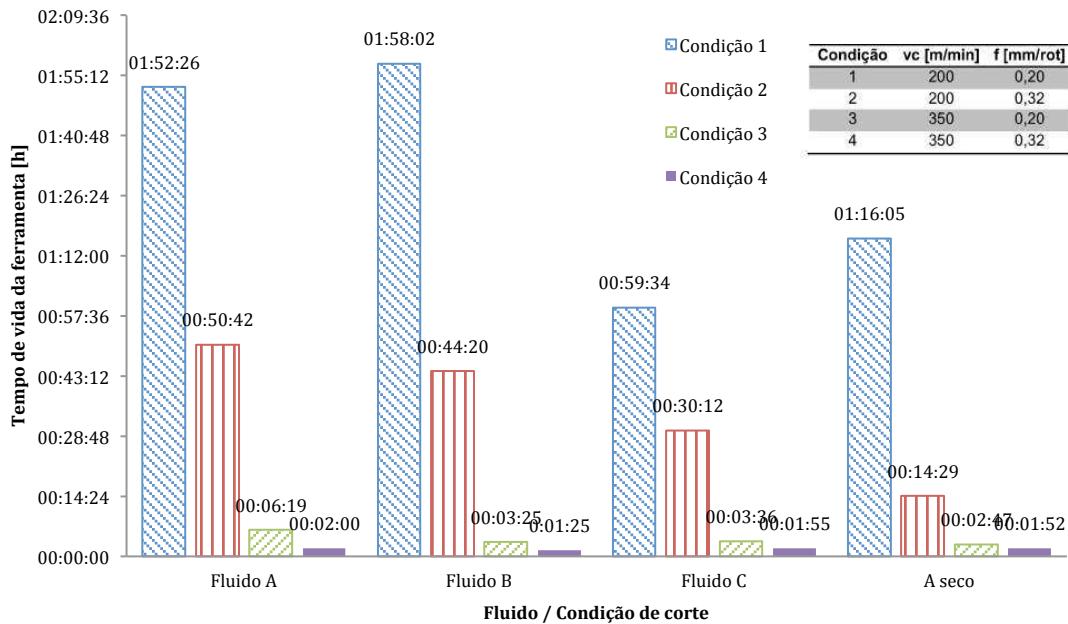


Figura 4.16: Comparação dos tempos de vida das ferramentas em cada condição de corte, usando como critério $VB_{B_{max}} = 0,6 \text{ mm}$

A partir da análise do gráfico da figura 4.16, o fluido de corte A (emulsão de base vegetal) foi o que proporcionou maiores vidas das ferramentas, apesar de ter proporcionado vida mais curta da ferramenta que o fluido B (semissintético de base mineral), na condição de corte mais branda ($V_c = 200 \text{ m/min}$ e $f = 0,2 \text{ mm/rev}$). O fluido de corte A forma uma emulsão, e isso é também uma explicação para o fato da durabilidade da ferramenta ter sido maior nas condições mais severas (maiores velocidades de corte ou maiores avanços), já que as “gotículas” do óleo de base vegetal estão em suspensão na mistura (pois a emulsão é uma mistura heterogênea ou bifásica, ou seja, seus componentes não se misturam realmente), e essas “partículas de óleo de base vegetal em suspensão” podem se alinhar mais facilmente com a ferramenta, formando um filme lubrificante e protegendo esta do desgaste. Além disto, a água presente na emulsão garante, também, a refrigeração. Os valores dos coeficientes de atrito dos fluidos A e B medidos no ensaio de atrito por

deslizamento (*reciprocating*) foram muito próximos, o que configura um comportamento muito próximo no que diz respeito à lubricidade desses fluidos, os dois apresentaram boas capacidades de lubrificação de acordo com os resultados deste ensaio. Já no ensaio para medição da capacidade de refrigeração, o fluido de corte A obteve um coeficiente de troca de calor por convecção (h) menor do que o h do fluido B, o que significa que o fluido de corte B tem melhor capacidade de troca de calor que o fluido de corte A. Entretanto, quando se avalia a combinação das duas funções (lubrificante e refrigerante), os resultados se mostraram favoráveis ao fluido de corte A. Essa boa capacidade de lubrificação também pode ser elucidada pelos valores dos ângulos de contato medidos no ensaio de molhabilidade: o ângulo de contato medido no fluido de corte A foi de $34,4^\circ$ e o do fluido de corte B foi de $43,6^\circ$ – os dois fluidos na concentração de 7%. Quanto maior o ângulo de contato, menor o espalhamento do fluido na superfície, portanto pode-se perceber que o fluido de corte B tem essa maior dificuldade de se espalhar que o fluido de corte A, o que influenciou no fato do fluido de corte A ter possibilitado maiores vidas das ferramentas. A viscosidade dos fluidos também pode ter sido um dos fatores que influenciaram nestes resultado, tendo o fluido de corte A apresentado a maior viscosidade medida no ensaio. Todas essas características demonstram que o fluido de corte A tornou possível que as ferramentas de corte durassem mais tempo antes de chegar ao seu fim de vida, dentre os três fluidos de corte estudados.

4.3. Desgaste das Ferramentas

No geral, a forma e os mecanismos de desgaste presentes na usinagem do material analisado (aço ABNT 1050) foram os mesmos durante todas as condições de corte e de lubri-refrigeração utilizadas nos ensaios: o desgaste de flanco, o desgaste de cratera e o mecanismo de desgaste adesivo (*attrition*) foram notados em todas as análises. O mecanismo abrasivo também aparece em algumas ferramentas. Fotos das análises realizadas são mostradas a seguir.

O desgaste observado nas ferramentas foi basicamente o desgaste de flanco, cujo valor máximo de 0,6 mm foi um dos critérios utilizado para o fim de

teste (de acordo com a norma NBR ISO 3685-1993). A figura 4.17 mostra a evolução do desgaste de flanco até o fim de vida da ferramenta após o teste com o fluido de corte A (emulsionável de base vegetal) aplicado na primeira condição, com menores valores de velocidade de corte e avanço ($V_c = 200 \text{ m/min}$ e $f = 0,20 \text{ mm/rot}$).

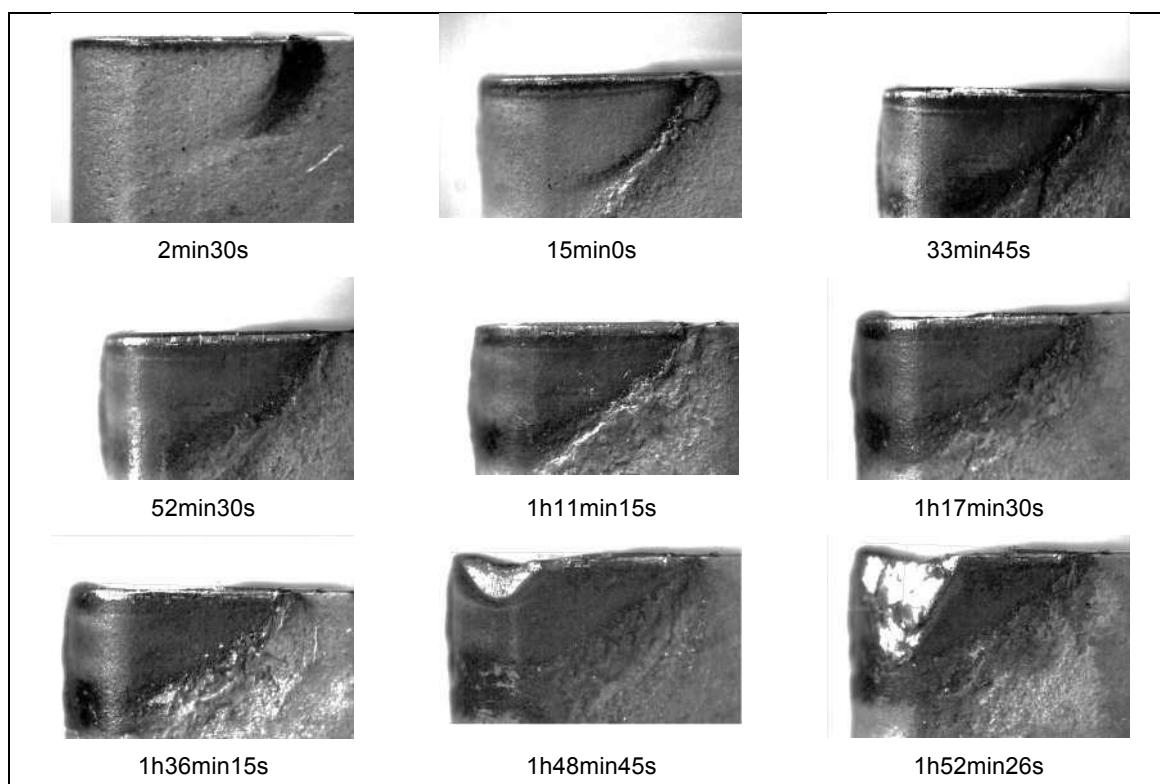


Figura 4.17: Evolução do desgaste de flanco até o fim de vida de uma das ferramentas, similar ao observado nas demais condições testadas. Usinagem com fluido de corte A (emulsionável de base vegetal) na 1^a. condição: $v_c = 200 \text{ m/min}$; $f = 0,20 \text{ mm/rot}$; $a_p = 2 \text{ mm}$ – Fonte: Estereomicroscópio, a própria autora.

A figura 4.18 mostra fotos das pontas das ferramentas usadas com cada condição lubri-refrigerante, quando usando os menores valores de velocidade de corte e avanço, tiradas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) após o critério de parada de 30 minutos de usinagem. Embora as fotos não mostram, não houve apenas o desgaste de flanco na ferramenta, mas também um desgaste de cratera na superfície de saída, o que foi observado em todas as ferramentas, em todas as condições de corte. Observa-se que o fluido de corte A (emulsão vegetal) e a condição a seco apresentaram maiores avarias na cunha cortante, ao final dos testes de vida das ferramentas.

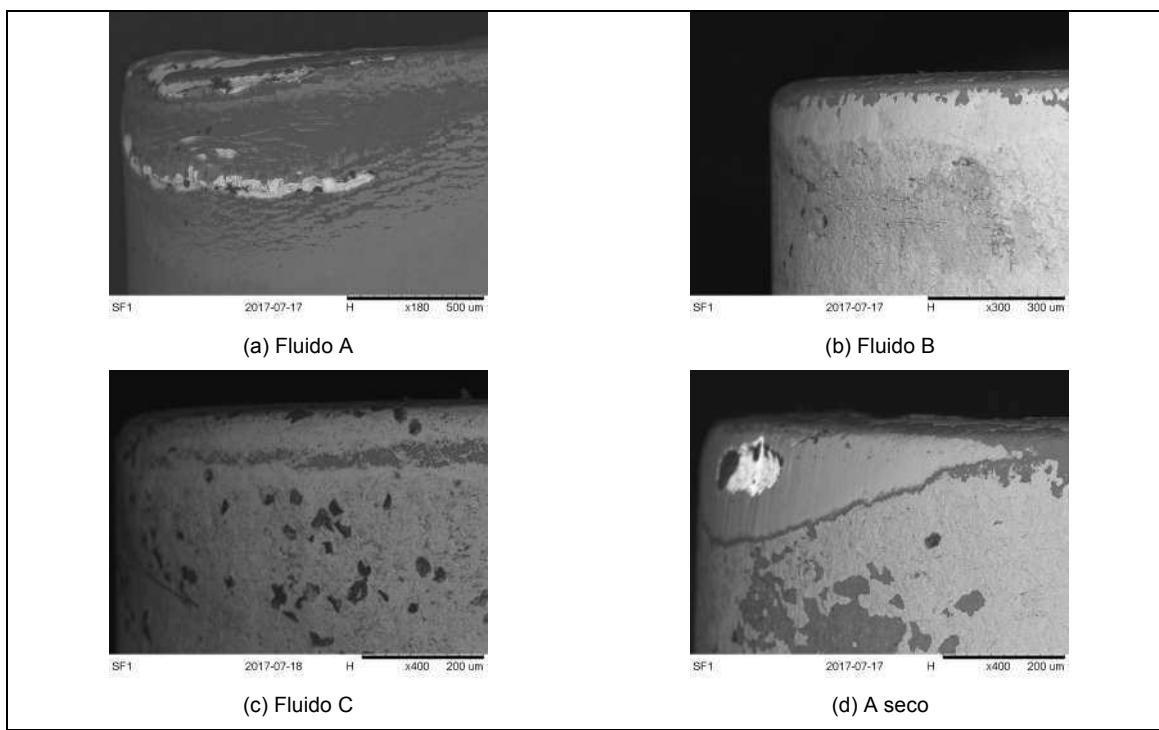


Figura 4.18: Foto da ponta das ferramentas após o critério de parada, na primeira condição ($v_c = 200 \text{ m/min}$; $f = 0,2 \text{ mm/rot}$; $a_p = 2 \text{ mm}$) – Fonte: MEV

A figura 4.19 e 4.20 contém detalhes das áreas desgastadas para identificar os mecanismos de desgaste, após usinar com o fluido de corte A (emulsionável de base vegetal) na primeira ($V_c = 200 \text{ m/min}$ e $f = 0,2 \text{ mm/rev}$) e na segunda condições de corte ($V_c = 200 \text{ m/min}$ e $f = 0,32 \text{ mm/rev}$). A partir das fotos das figuras 4.18 a 4.20, é possível observar que houve um desgaste de cratera e a presença de deformação plástica na aresta da ferramenta. O material da peça aderido e os aspectos das superfícies desgastadas com asperezas granulares evidenciam predomínio do mecanismo de desgaste adesivo (*attrition*). Apesar de sulcos paralelos, característica do mecanismo de desgaste abrasivo, serem observados nas fotos, estes são nas superfícies de material aderido, não podendo, portanto, serem assumidos como atuantes na superfície da ferramenta. O mecanismo de desgaste adesivo foi observado em todas as condições ensaiadas, o que se explica pelo fato dos materiais da peça e da ferramenta serem sempre os mesmos, e as condições de corte utilizadas favorecerem este mecanismo de desgaste.

A figura 4.21 contém fotos das pontas das ferramentas após usinar na segunda condição de corte ($V_c = 200 \text{ m/min}$ e $f = 0,32 \text{ mm/rev}$) com todas as

condições lubri-refrigerantes testadas. Observa-se um desgaste de flanco acentuado, caracterizando uma avaria no final de vida da usinagem feita com o fluido de corte B (semisintético de base mineral). Nesta condição, o aspecto da superfície (presença de sulcos paralelos) indica a predominância do mecanismo de desgaste por abrasão. Normalmente, quando o material da peça não contém partículas demasiadamente duras e abrasivas, como é o caso do aço ABNT 1050, este mecanismo de desgaste é precedido do mecanismo de desgaste adesivo (*attrition*), efusivo mecanismo fornecedor de partículas duras (grãos de carbonetos da própria ferramenta) para promover a abrasão (TRENT e WRIGHT, 2000; MACHADO et al., 2015).

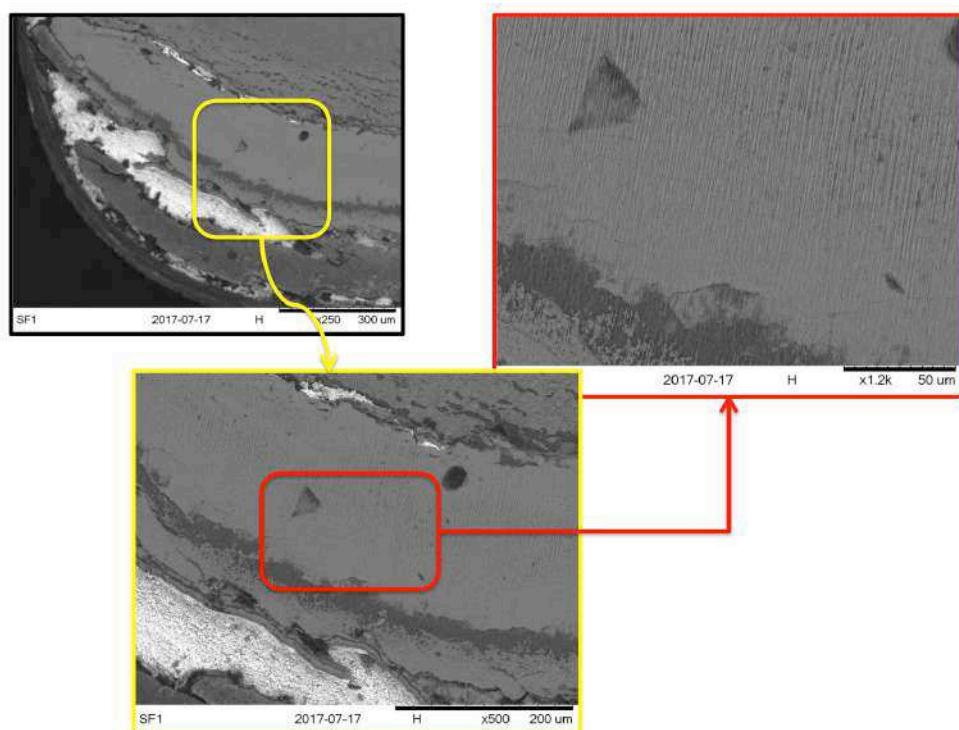


Figura 4.19: Fotos da ferramenta após usinar na primeira condição ($V_c = 200 \text{ m/min}$ e $f = 0,2 \text{ mm/rot}$), usando o fluido de corte A (emulsionável de base vegetal).

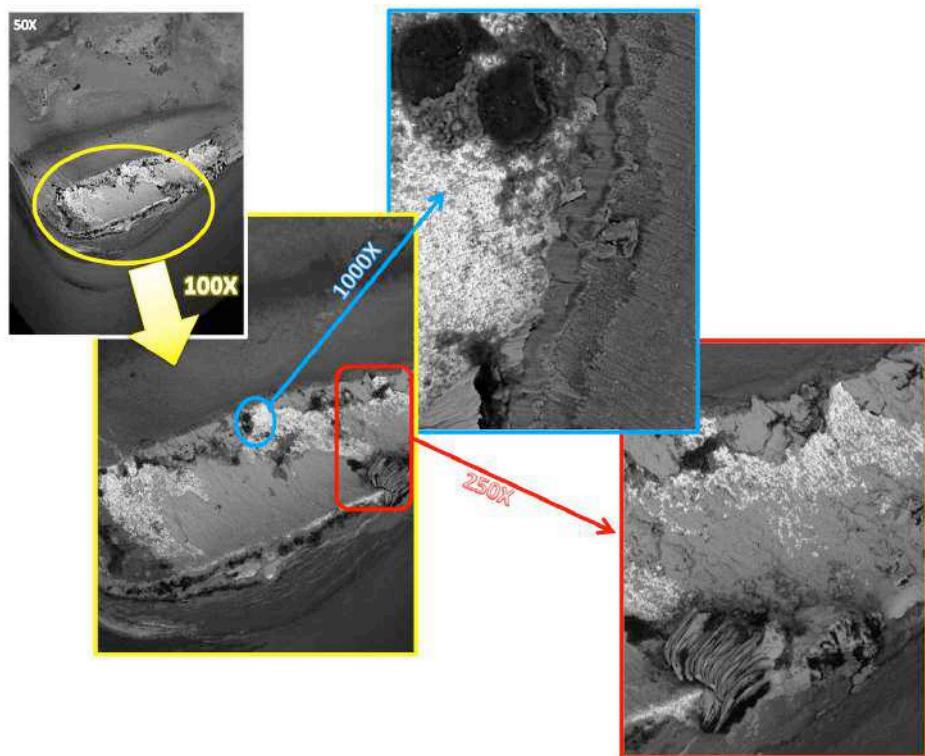


Figura 4.20: Fotos da ferramenta após usinrar na segunda condição ($V_c = 200 \text{ m/min}$ e $f = 0,32 \text{ mm/rot}$), usando o fluido de corte A (emulsionável de base vegetal).

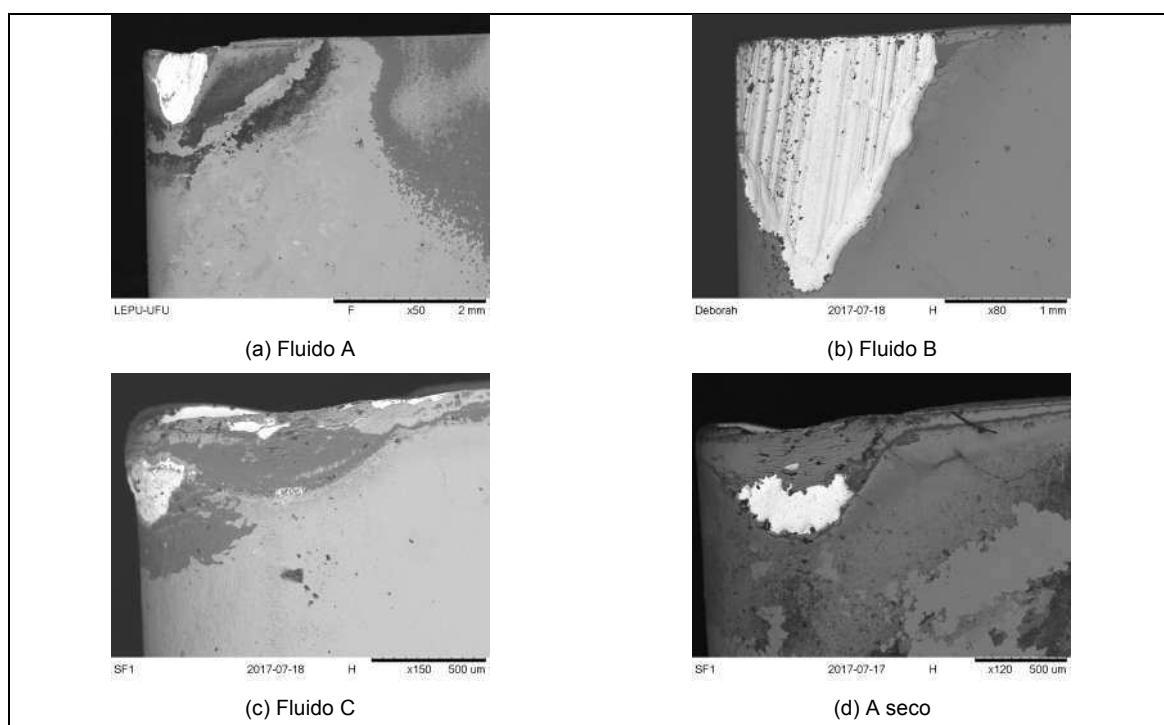


Figura 4.21: Foto da ponta das ferramentas após o critério de parada, usinando na segunda condição de corte ($v_c = 200 \text{ m/min}$; $f = 0,32 \text{ mm/rot}$; $a_p = 2 \text{ mm}$) – Fonte: MEV

Os testes nas condições 3 e 4, feitos usando a maior velocidade de corte (350 m/min), foram mais rápidos do que os testes feitos na menor velocidade (200 m/min). A explicação para esse fato é que, segundo a literatura (MACHADO *et al.*, 2015), a ferramenta realmente se desgasta mais rapidamente quanto maior for a velocidade de corte. Isso foi observado e mostrado nos gráficos da figura 4.16. A figura 4.22 contém fotos do desgaste das ferramentas usadas nos testes feitos na terceira condição, onde a velocidade de corte era de $v_c = 350\text{ m/min}$ e o avanço era $f = 0,20\text{ mm/rot}$. Ocorreu avarias no fim de vida das ferramentas usadas com a utilização de todos os meios lubri-refrigerantes. A Figura 4.22(a) evidencia um desgaste de flanco pronunciado, caracterizando o colapso da ferramenta utilizada no teste com o fluido de corte A (emulsionável de base vegetal), que envolveu desgaste abrasivo (sulcos paralelos) e provavelmente deformação plástica. Como já mencionado, a presença de mecanismo de desgaste por adesão deve ter precedido a abrasão. Na figura 4.22(b), para a ferramenta que usou o fluido de corte B (semissintético de base mineral), observa-se, também, um desgaste de flanco pronunciado, porém com uma área com característica da predominância do mecanismo de desgaste adesivo (*attrition*), onde asperezas granulares estão presentes. Na periferia dessa área mais áspera, são observados sulcos paralelos, que indicam a presença do mecanismo de desgaste abrasivo, como encontrado por Ozcelik *et al.* (2011).

A ferramenta utilizada na usinagem com o fluido de corte C (sintético de base vegetal) (figura 4.22(c)), apresentou um desgaste de flanco cujas características evidenciam regiões com predominância de mecanismos de desgaste por adesão, abrasão e difusão. A difusão é uma evidência de que a temperatura de corte nesta condição foi mais elevada. A ferramenta utilizada no corte a seco na condição de corte 3, mostrada na figura 4.22(d), apresentou uma fratura da aresta, evidenciando a severidade desta condição. As características da superfície desgastada indicam a presença de difusão (superfície lisa) e adesão (rugosidade granular).

A figura 4.23 mostra detalhes da superfície de saída da ferramenta usada na condição de corte 3, quando o fluido de corte A (emulsão de base

vegetal) foi utilizado. Os detalhes evidenciam a predominância do mecanismo de desgaste por adesão (*attrition*).

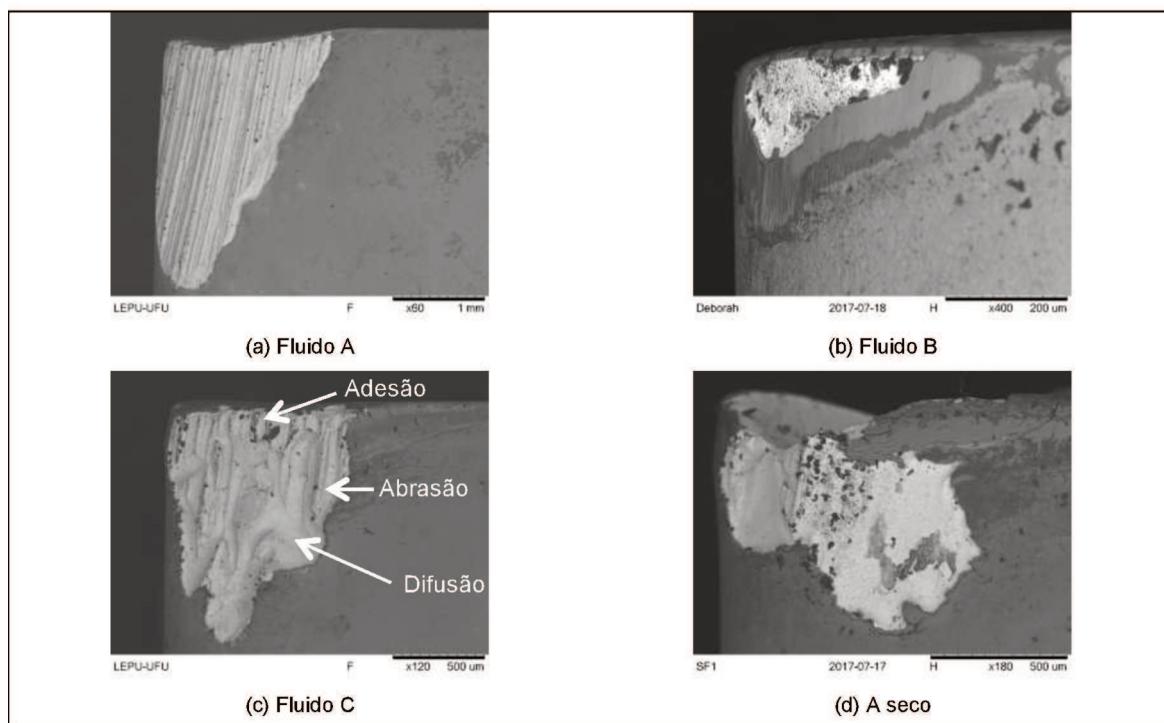


Figura 4.22: Avarias observadas no fim de vida das ferramentas usadas nos teste na terceira condição ($v_c = 350 \text{ m/min}$ e $f = 0,20 \text{ mm/rot}$, $a_p = 2 \text{ mm}$). Fonte: MEV

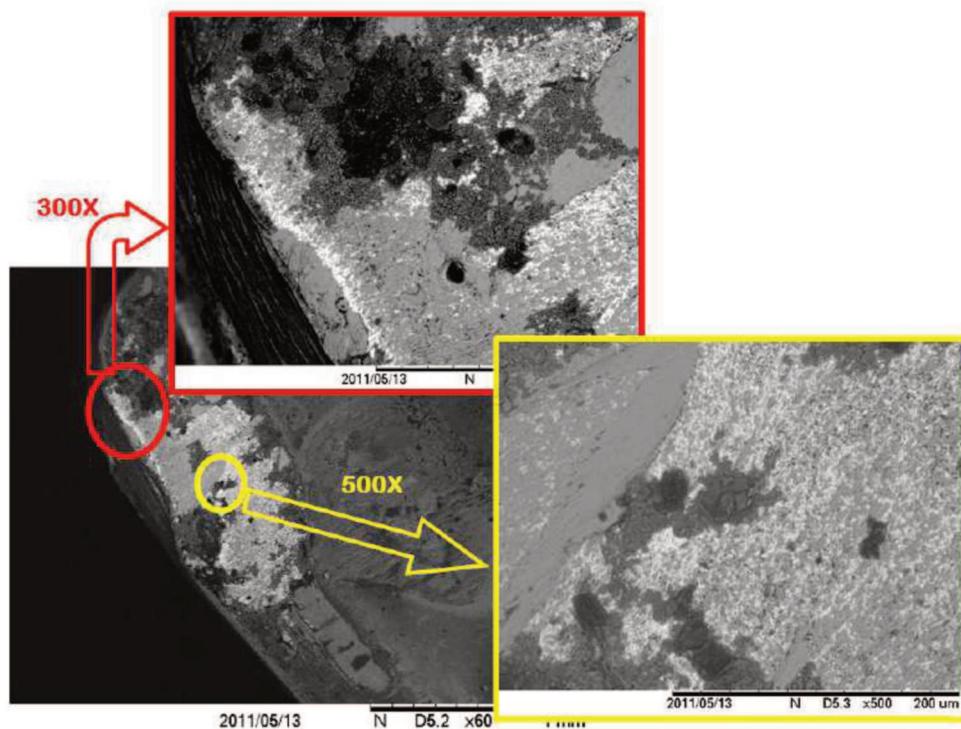


Figura 4.23: Fotos da ferramenta após usinar na terceira condição ($V_c = 350 \text{ m/min}$ e $f = 0,2 \text{ mm/rot}$), usando o fluido de corte emulsão de base vegetal A.

Na usinagem com a condição mais severa, $v_c = 350 \text{ m/min}$ e $f = 0,32 \text{ mm/rot}$, o tempo de vida da ferramenta máximo foi de 2 minutos, quando se utilizou o fluido de corte A. As ferramentas avariadas utilizadas nesta condição de corte podem ser vistas na figura 4.24.

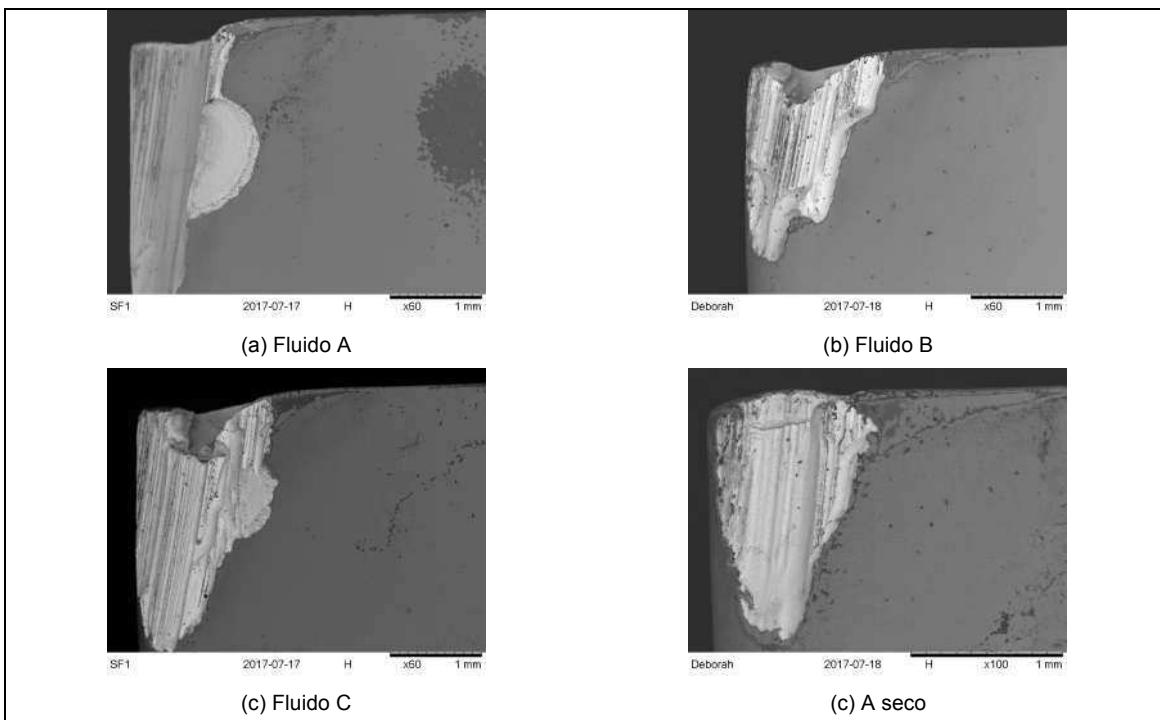


Figura 4.24: Avarias das ferramentas usadas nos ensaios na quarta condição, onde $v_c = 350 \text{ m/min}$ e $f = 0,32 \text{ mm/rot}$, $a_p = 2 \text{ mm}$.

É possível observar regiões de desgaste bem liso – evidências de mecanismo de desgaste difusivo –, e sulcos paralelos desenvolvidos na direção do fluxo do material da peça – evidência do mecanismo de desgaste abrasivo –, além de algumas regiões com asperezas indicativas da presença de mecanismo de desgaste adesivo.

Detalhes da superfície de saída das ferramentas que utilizou o fluido de corte C (sintético de base vegetal) e na condição a seco são mostrados nas figuras 4.25 e 4.26, respectivamente. O mecanismo de desgaste que predomina é o abrasivo (microssulcos paralelos na direção do fluxo de material do cavaco). As partículas abrasivas se soltaram, provavelmente da ferramenta, por outro mecanismo de desgaste, o adesivo (*attrition*), como sugerem algumas

áreas ásperas observadas nestas figuras, e mergulharam no fluxo de material, causando assim o desgaste na superfície de saída da ferramenta. Este comportamento, como dito anteriormente, foi notado em todas as condições de corte e em todas as condições de lubri-refrigeração.

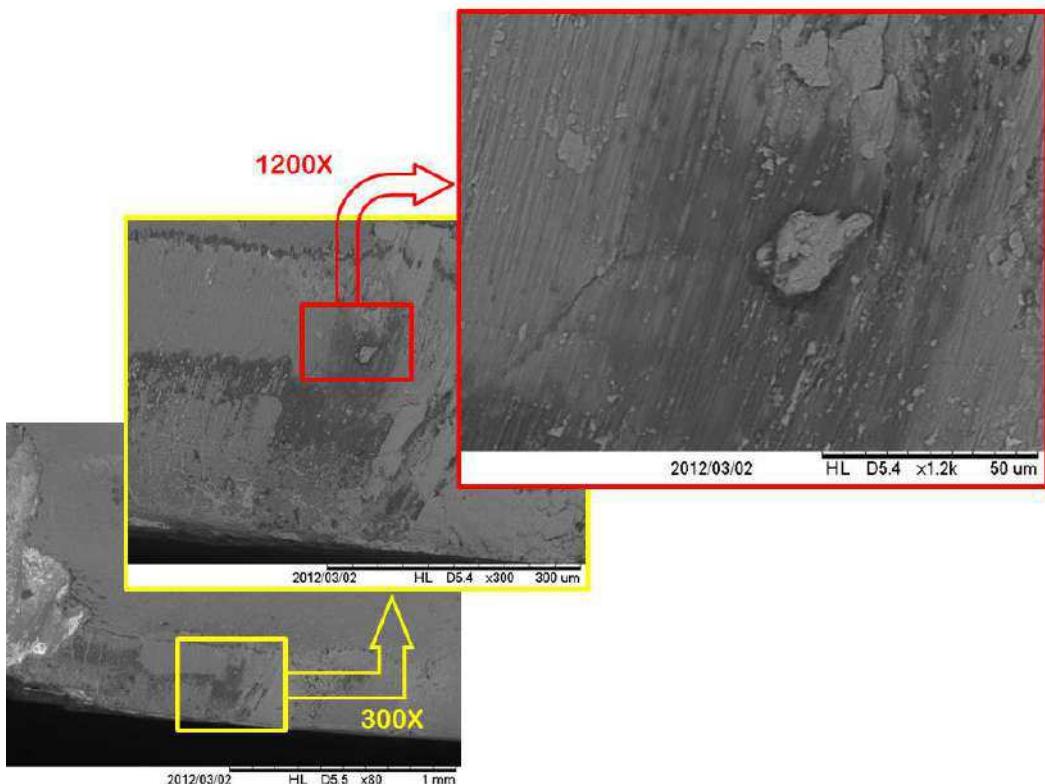


Figura 4.25: Fotos com diferentes aumentos da superfície de saída da ferramenta após usinar na quarta condição de corte, $v_c = 350\text{m/min}$ e $f = 0,32\text{mm/rot}$, usando fluido de corte C (sintético de base vegetal).

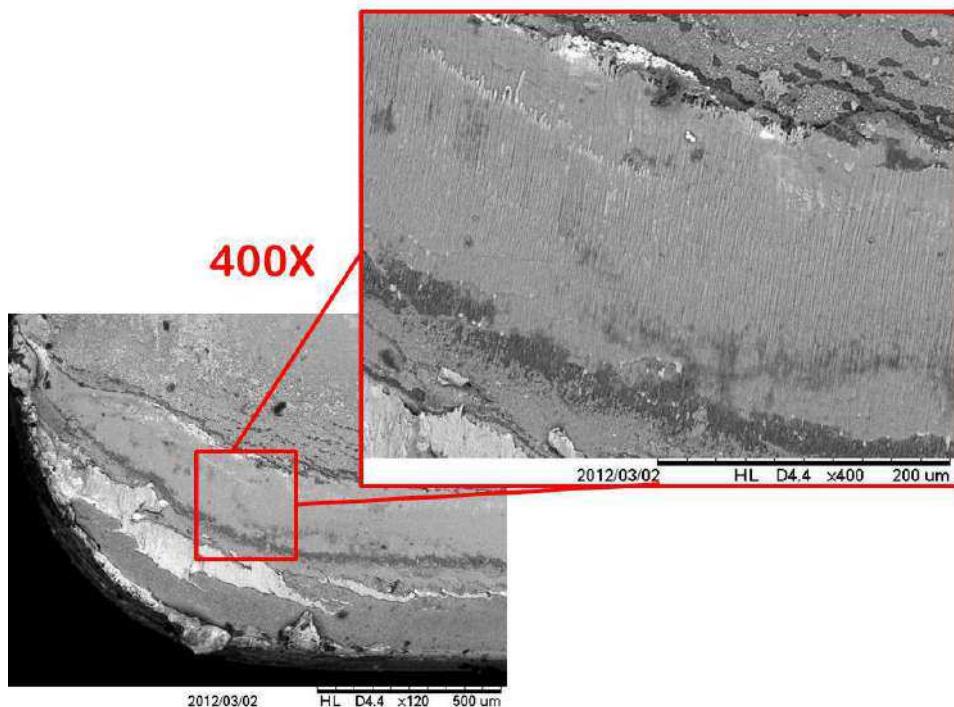


Figura 4.26: Região de desgaste da superfície de saída da ferramenta após usinagem a seco na quarta condição $v_c = 350\text{m/min}$ e $f = 0,32\text{mm/rot}$

4.4. Resultados dos Ensaios de Força

Foram feitas várias comparações entre os dois fluidos de corte de base vegetal e o de base mineral e também com a usinagem a seco, e os resultados são mostrados a seguir, analisando-os em relação à concentração dos fluidos na emulsão e/ou solução e em relação aos tipos de fluidos.

4.4.1. Variação da Velocidade de Corte

As figuras 4.27, 4.28 e 4.29 possuem os gráficos do comportamento das forças de usinagem medidas quando a velocidade de corte era variada. A força de usinagem é resultado da soma vetorial dos três principais forças atuantes: a força de corte, a força de avanço e a força passiva, de acordo com a equação 4.3:

$$\vec{F}_U = \vec{F}_C + \vec{F}_f + \vec{F}_p \quad \text{Equação 4.3}$$

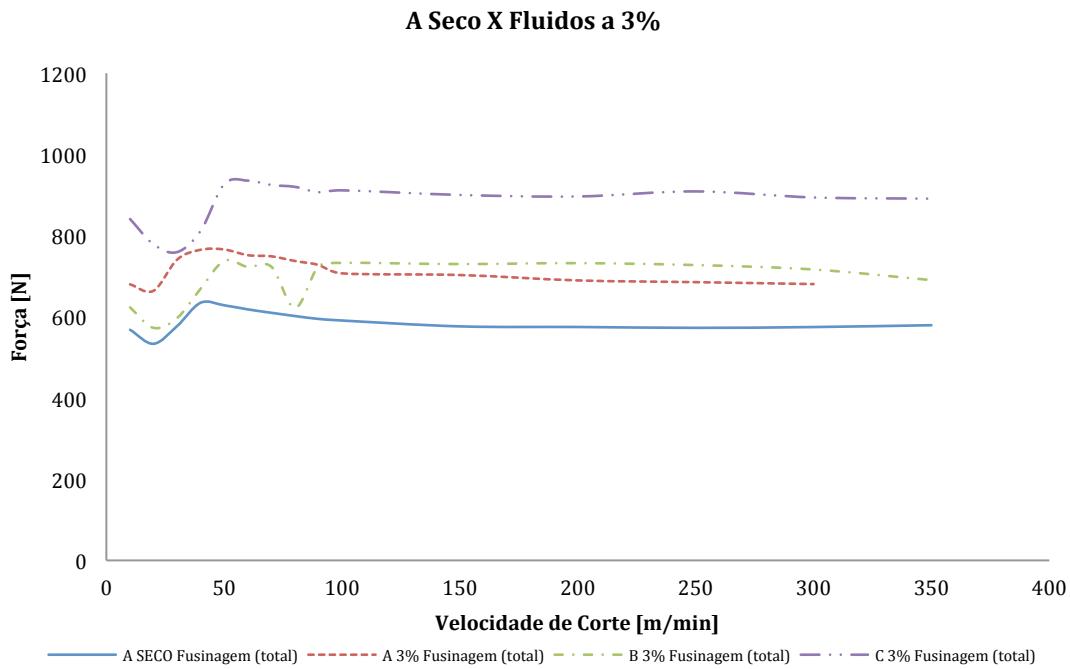


Figura 4.27: Variação da Força de Corte, Avanço e Usinagem com a Velocidade de Corte; fluidos a 3%; $f = 0,2 \text{ mm/rot}$; $a_p = 2 \text{ mm}$

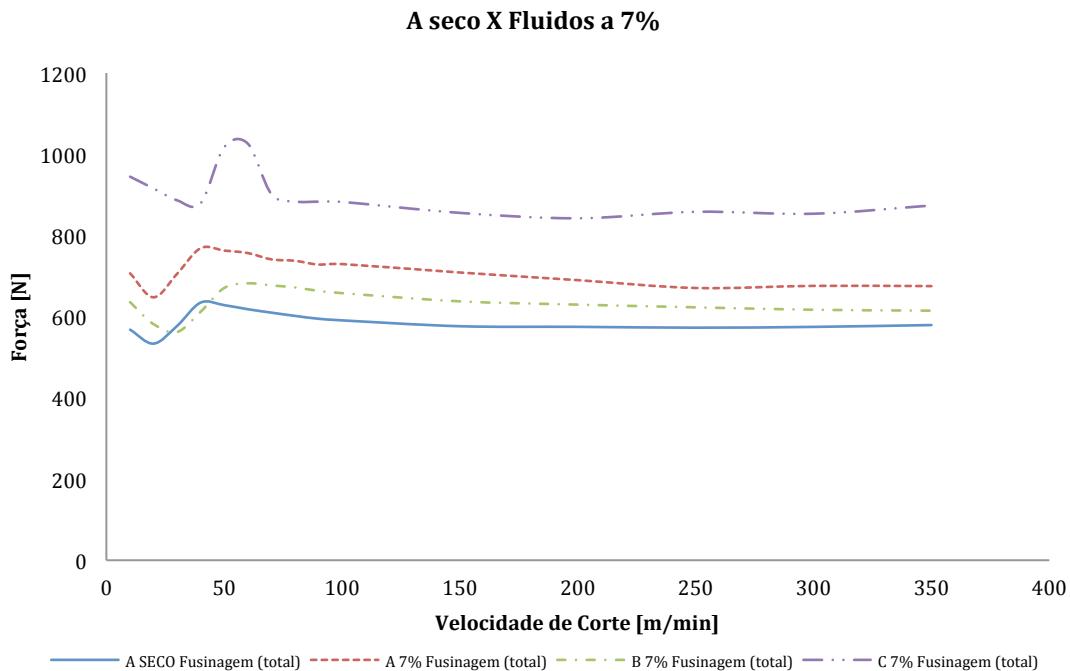


Figura 4.28: Variação das Forças de Corte, Avanço e Usinagem com a Velocidade de Corte; fluidos a 7%; $f = 0,2 \text{ mm/rot}$; $a_p = 2 \text{ mm}$

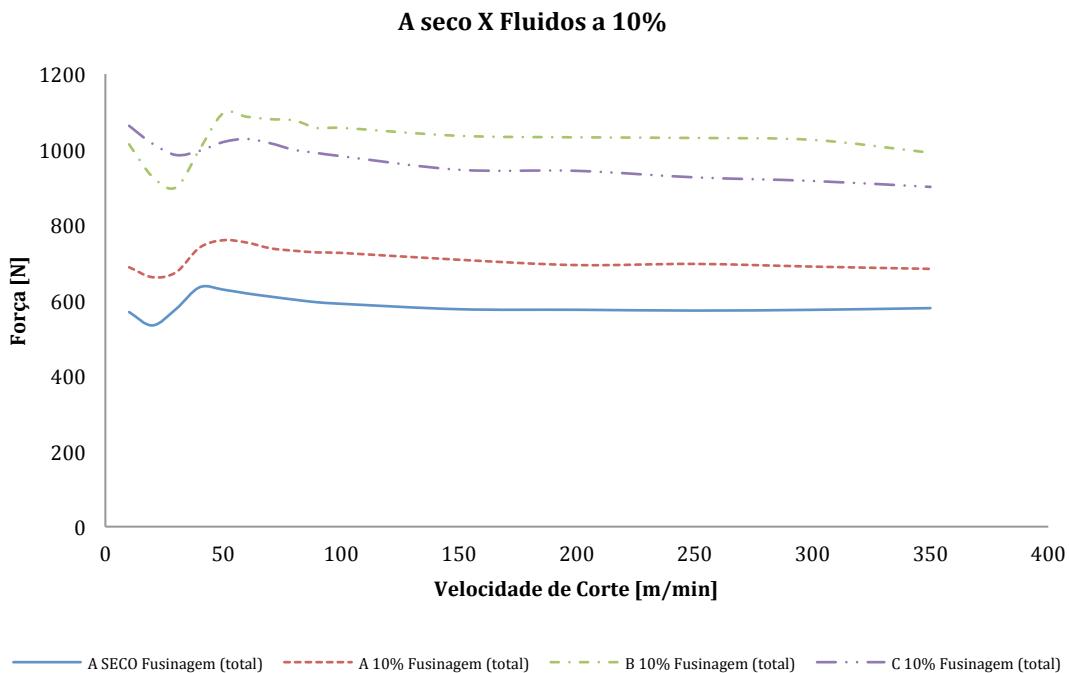


Figura 4.29: Variação das Forças de Corte, Avanço e Usinagem com a Velocidade de Corte; fluidos a 10%; $f = 0,2 \text{ mm/rot}$; $a_p = 2 \text{ mm}$

Comparando-se as forças de usinagem quando se varia a velocidade de corte, nas concentrações dos fluidos de 3%, 7% e 10%, pode-se observar que, tanto as forças de corte, como as de avanço e as forças de usinagem (soma vetorial das três componentes de forças), foram maiores quando da utilização do fluido C (sintético de base vegetal) nas concentrações de 3% e 7%, e o fluido de corte B (semissintético de base mineral) na concentração de 10%. O fluido de corte C é sintético, isento de óleo mineral em sua composição, e que forma uma solução perfeita quando misturado em água. Toda essa quantidade de água torna mais proeminente a capacidade de refrigeração do fluido de corte, o que faz com que a resistência ao cisalhamento do material aumente na região do corte, dificultando a remoção de material, e, consequentemente, aumentando os valores das forças. Além disso, o fluido de corte C obteve o maior coeficiente de atrito medido no ensaio de atrito *reciprocating*, configurando assim seu menor poder de lubrificação em comparação com os outros dois fluidos de corte. Quanto menor a capacidade de lubrificação, mais dificuldade terá o escoamento do cavaco, e isso dificulta o corte, fazendo com que as forças sejam maiores. O coeficiente de troca de calor por convecção (h)

do fluido de corte C também foi o menor entre os valores dos três fluidos, sendo o menor de todos na concentração de 10%. Isso significa que este fluido tem mais dificuldade de trocar calor com o ar do que os outros fluidos testados. Quando esse calor não se dissipa, o fluido fica mais tempo em contato com a peça, ferramenta e cavaco, e a presença desse fluido faz com que a usinagem se torne mais difícil de ser realizada, já que a refrigeração da peça na área de contato cavaco-ferramenta-peça torna o material da peça mais resistente, dificultando o corte.

É possível observar o comportamento característico das curvas de forças na usinagem de aços (MACHADO et al., 2009; TRENT e WRIGHT, 2000), apresentando o perfil “V” em baixas velocidades (entre 10 e 60 m/min), e evidenciando a presença de Aresta Postiça de Corte (APC) em todas as condições lubri-refrigerantes. Neste intervalo de velocidade, a APC cresce até uma dimensão máxima, e depois decresce até desaparecer completamente. A força de corte acompanha esta variação de dimensão da APC, diminuindo com o crescimento da mesma, atingindo um ponto de mínimo (onde a dimensão da APC é máxima – para as curvas obtidas nos ensaios, em velocidades entre 20 e 30 m/min) e depois crescendo com a diminuição da APC, até o ponto onde ela desaparece completamente. A presença de algumas oscilações nesta região pode estar relacionada com a falta de definição do valor de velocidade de corte em que esta APC desaparece completamente, e o fluido de corte pode ter papel importante nesta definição.

Comparando-se todas as condições, verificou-se que as forças de corte foram maiores quando o fluido C foi usado na concentração de 10%, e foram menores quando da utilização do fluido A (emulsionável de base vegetal), na concentração de 10%, apesar das forças medidas quando usinando a seco terem sido menores do que todas as forças medidas usando fluidos de corte. Este ranking obtido pelos fluidos, salvo outras influências, pode ser explicado pelo poder de penetração e de lubrificação na interface cavaco-ferramenta. O fluido de corte para ser efetivo na sua ação lubrificante tem que se fazer presente na interface (apenas na região de escorregamento) e de ter a capacidade de interagir com o material da peça para formar um filme lubrificante eficiente (MACHADO et al., 2015; SALES et al., 2001). Além disso, nos ensaios para medição da molhabilidade, o fluido de corte A na

concentração de 10% apresentou a melhor capacidade de espalhamento (molhabilidade), o que explica este seu maior “poder de penetração” na interface entre ferramenta e cavaco.

Em todas as condições lubri-refrigerantes testadas as menores forças foram medidas na condição a seco, pois nesta condição não há a refrigeração proporcionada pelo fluido e a consequente redução da temperatura na interface cavaco-ferramenta, que promoveria o aumento das forças. Sem o fluido, o calor gerado age reduzindo a resistência ao cisalhamento do material, atuando, assim, a favor da usinagem.

4.4.2. Variação do avanço da ferramenta (f)

À medida que o avanço aumenta, a força de corte também cresce, de forma linear, e esse comportamento foi observado em todas as condições de lubri-refrigeração utilizadas nos ensaios. Os resultados das forças de corte com a variação do avanço da ferramenta podem ser vistos nas figuras 4.29, 4.30 e 4.31.

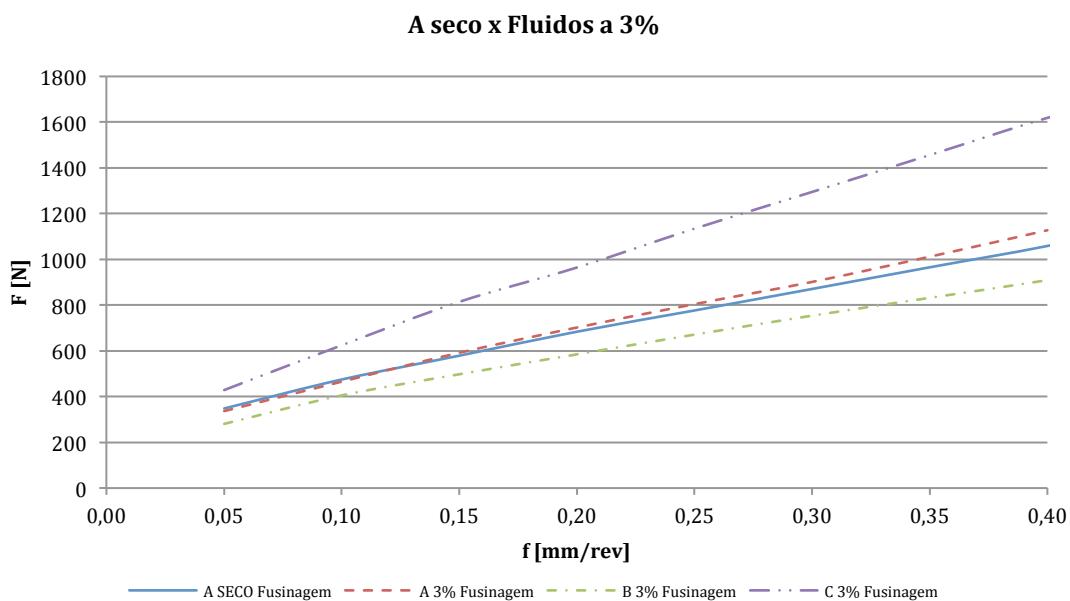


Figura 4.30: Variação das Forças de Corte, Avanço e Usinagem com a variação do avanço da ferramenta; fluidos a 3%; $v_c = 200 \text{ m/min}$; $a_p = 2 \text{ mm}$

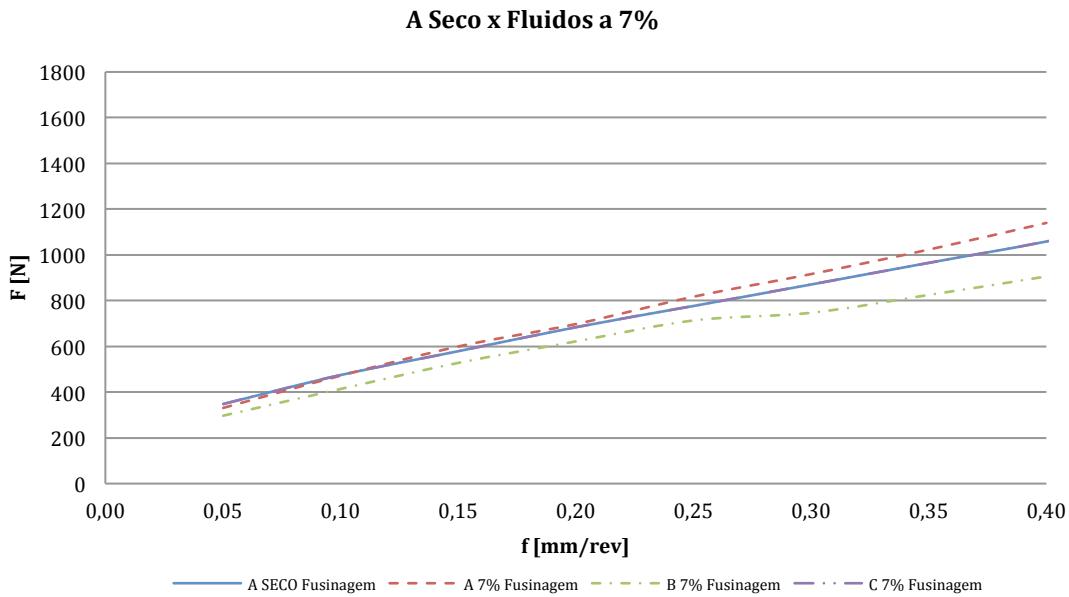


Figura 4.31: Variação das Forças de Corte, Avanço e Usinagem com a variação do avanço da ferramenta; fluidos a 7%; $v_c = 200 \text{ m/min}$; $a_p = 2 \text{ mm}$

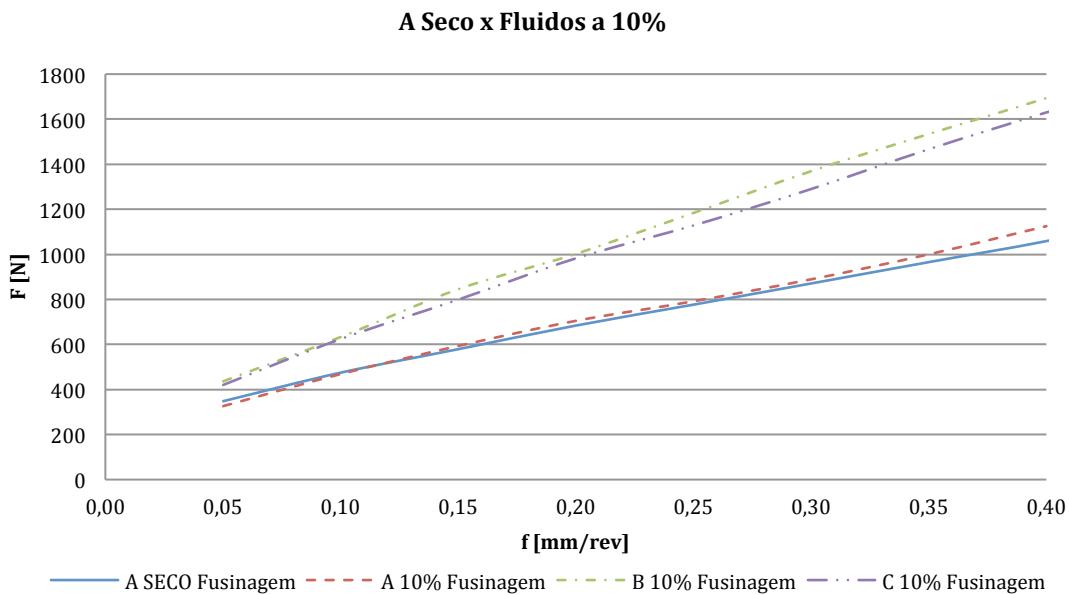


Figura 4.32: Variação da Força de Corte, Avanço e Usinagem com a variação do avanço da ferramenta; fluidos a 10%; $v_c = 200 \text{ m/min}$; $a_p = 2 \text{ mm}$

Os valores das forças ficaram muito próximos uns dos outros para os fluidos estudados, no geral, mas é possível observar que o fluido de corte C nas três concentrações estudadas, apresentou maiores forças de usinagem. Esse resultado pode ser melhor visualizado nos gráficos das figuras 4.32, onde

somente as forças de usinagem (resultante das três forças principais – corte, avanço e passiva) são considerados.

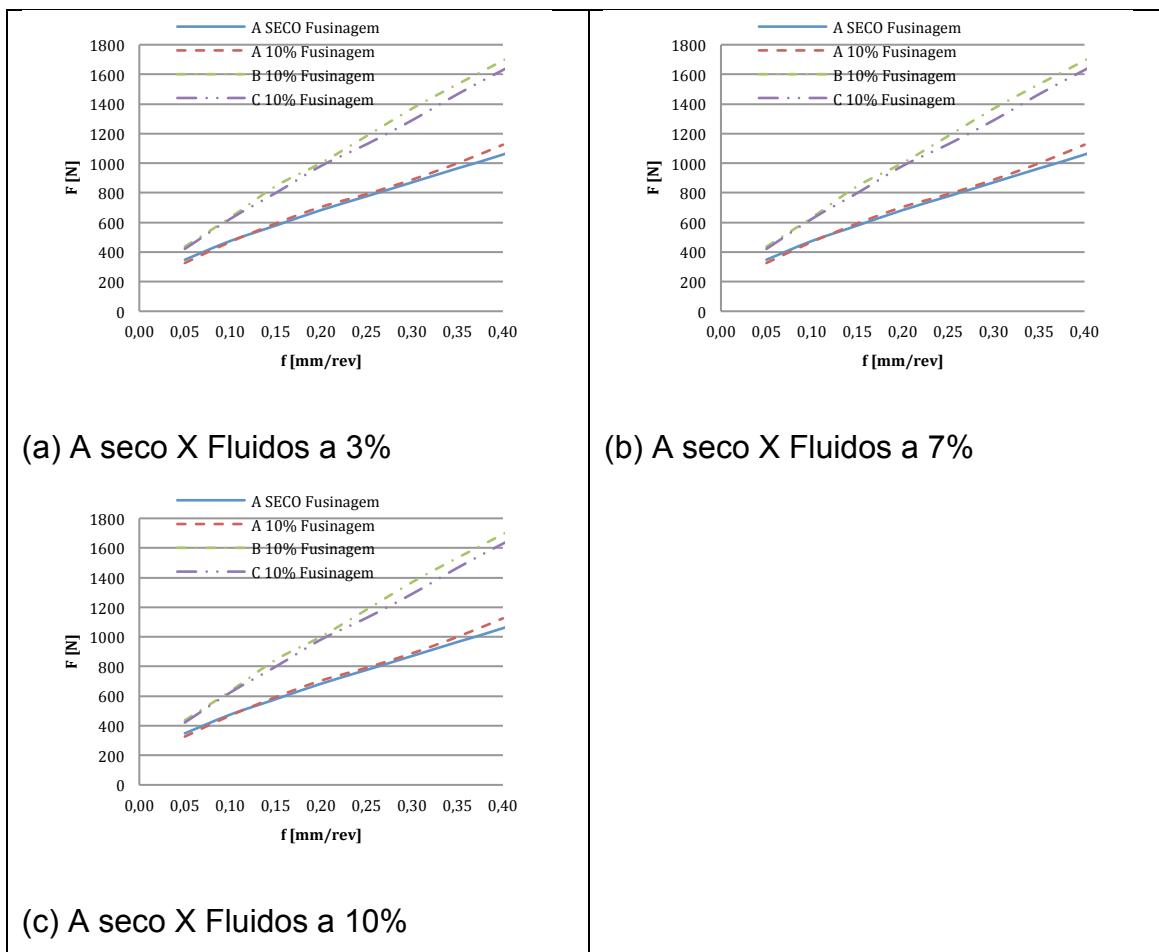


Figura 4.33: Forças de Usinagem (força resultante) medidas em todas as condições lubri-refrigerantes testadas

A partir dos gráficos da figura 4.32 fica mais fácil identificar que no geral as forças de usinagem foram maiores quando a usinagem foi feita utilizando-se o fluido de corte C (sintético de base vegetal), apesar do fluido de corte B (semissintético de base mineral) na concentração de 10% ter apresentado forças de usinagem com valores superiores, mas muito próximos, aos valores das forças de usinagem usando o fluido de corte C. Este comportamento das forças de usinagem foi o mesmo encontrado nos valores de força medidos quando a velocidade de corte era variada.

O fluido de corte C (sintético de base vegetal), na concentração de 3%, em sua caracterização, mostrou-se um fluido com boa capacidade de refrigeração, já que apresentou o maior valor do coeficiente de troca de calor

por convecção (h) calculado após o ensaio para avaliação da capacidade refrigerante. Apesar disso, o mesmo fluido nas concentrações de 7% e 10% apresentaram as menores capacidades de troca de calor avaliadas. Quando o fluido de corte possui uma boa capacidade de refrigeração, o calor necessário para a deformação e cisalhamento do material da peça é retirado, e isso impede o amolecimento da peça localmente pela temperatura. Isso dificulta muito mais a retirada do material, e com isso observa-se o aumento das forças de usinagem, já que é necessário maior força para vencer a resistência do material agora mais resistente. Esse fluido de corte C, na concentração de 3%, também apresentou um valor alto do ângulo de contato medido no ensaio de molhabilidade. Isso significa que, além da boa capacidade refrigerante, esse fluido também possui dificuldade em se espalhar na superfície, e isso também é um ponto que influencia nos maiores valores de força, pois a tendência aqui seria menor capacidade de lubrificação, tornando o corte mais difícil de ser realizado. Além dessas características, os fluidos de corte B e C nas concentrações de 10% foram os que apresentaram os maiores valores de coeficiente de atrito medidos no ensaio de deslizamento. Essa característica dificulta a lubrificação durante o corte, o que também se torna uma das causas dos maiores valores de forças encontrados.

O fluido de corte B, semissintético de base mineral, apresentou os menores valores de força medidos quando nas concentrações de 3% e 7%, porém na concentração de 10%, apresentou valores tão altos quanto os valores medidos com a utilização do fluido de corte C nessa mesma concentração. Este fluido de corte nessas duas concentrações (3% e 7%) apresentou valores baixos de viscosidade, e isso pode explicar sua melhor capacidade de lubrificação, apresentada a partir do resultado observado. Os fluidos de corte de base mineral possuem mais óleos em sua composição, o que tornam os fluidos de corte mais lubrificantes que refrigerantes. Além disso, a capacidade lubrificante de um fluido de corte tende a facilitar a usinagem, já que melhora a movimentação do cavaco sobre a superfície da ferramenta de corte. Isso também é aliado a sua boa capacidade de molhamento, que faz com que o fluido de corte penetre melhor na interface entre o material da ferramenta e do cavaco (peça), e faz com que as forças de usinagem também sejam menores.

4.5. Ensaios de Temperatura de Usinagem

Usando os valores médios da diferença de potencial elétrico (ddp) obtidos no ensaio de temperatura na equação de calibração, obtém-se a temperatura média da interface cavaco-ferramenta para cada teste. Assim, é possível obter as curvas mostradas na figura 4.34, que mostra o comportamento das temperaturas de usinagem em função da velocidade de corte.

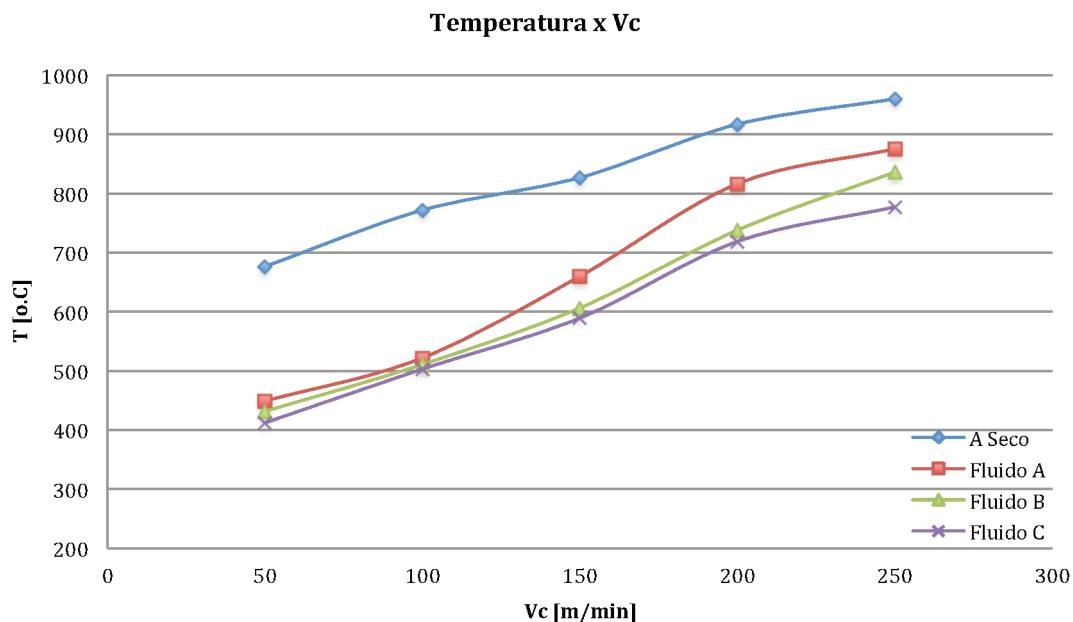


Figura 4.34: Temperaturas de usinagem obtidas pelo método do termopar ferramenta-peça, em função da velocidade de corte; $f = 0,2\text{mm/rev}$ e $a_p = 1\text{mm}$

Observa-se que a temperatura da interface cavaco-ferramenta aumenta com o aumento da velocidade de corte, como era de se esperar, pois há um aumento na taxa de deformação do material nos planos de cisalhamento, aumentando a energia de cisalhamento e a geração de calor (MACHADO et al., 2015). Isso ocorreu independentemente da condição lubri-refrigerante usada.

A temperatura da interface cavaco-ferramenta é resultado da energia consumida para cisalhar o material na zona de cisalhamento secundário (MACHADO et al., 2015). Portanto, a função lubrificante do fluido de corte vai

reduzir a energia necessária para o corte e a função refrigerante do fluido ajuda a dissipar o calor gerado no processo. Porém, a ação refrigerante atua também na peça e no cavaco e pode aumentar a resistência dos mesmos, dificultando o corte e implicando em maior energia necessária para a formação do cavaco (MARQUES, 2015; MACHADO et al., 2015).

Nas velocidades de corte mais baixas (de 50 a 100 m/min), praticamente não há diferenças nas temperaturas da interface quando utilizando os fluidos de corte. Nestas condições então, pode-se afirmar que a ação lubri-refrigerante dos fluidos tendem a se equilibrar. Em todas as velocidades de corte, as temperaturas foram maiores quando a usinagem era feita sem a utilização de fluidos de corte (a seco). Comparando-se apenas as situações onde os fluidos foram usados, na maior velocidade de corte que o ensaio foi realizado, 250 m/min, é possível ver que o fluido de corte A (emulsãoável de base vegetal) proporcionou maiores temperaturas de usinagem, e o fluido de corte C (sintético de base vegetal) proporcionou as menores temperaturas. O fluido de corte C apresentou uma menor capacidade de troca de calor no ensaio para verificação da capacidade refrigerante do que o fluido de corte A, talvez pelo fato de sua viscosidade ser menor do que a viscosidade do fluido A. Normalmente a menor viscosidade promove uma melhor penetração do fluido na interface cavaco-ferramenta, e consequentemente a capacidade de transferência de calor fica maior. Esta provavelmente é a explicação para o fluido de corte C ter proporcionado menores temperaturas na interface cavaco-ferramenta.

4.6. Rugosidade das peças usinadas

Durante os ensaios de vida foram realizadas medições das rugosidades das superfícies usinadas. Usou-se um rugosímetro portátil e a cada parada para medição do desgaste da ferramenta, as medições dos parâmetros de rugosidades R_a , R_q e R_z eram realizadas. Durante as medições, foi possível observar que o comportamento das rugosidades da superfície eram praticamente constante com o aumento do desgaste da ferramenta, então, tirou-se uma média e esses valores foram plotados nos gráficos das figuras 4.36 a 4.38.

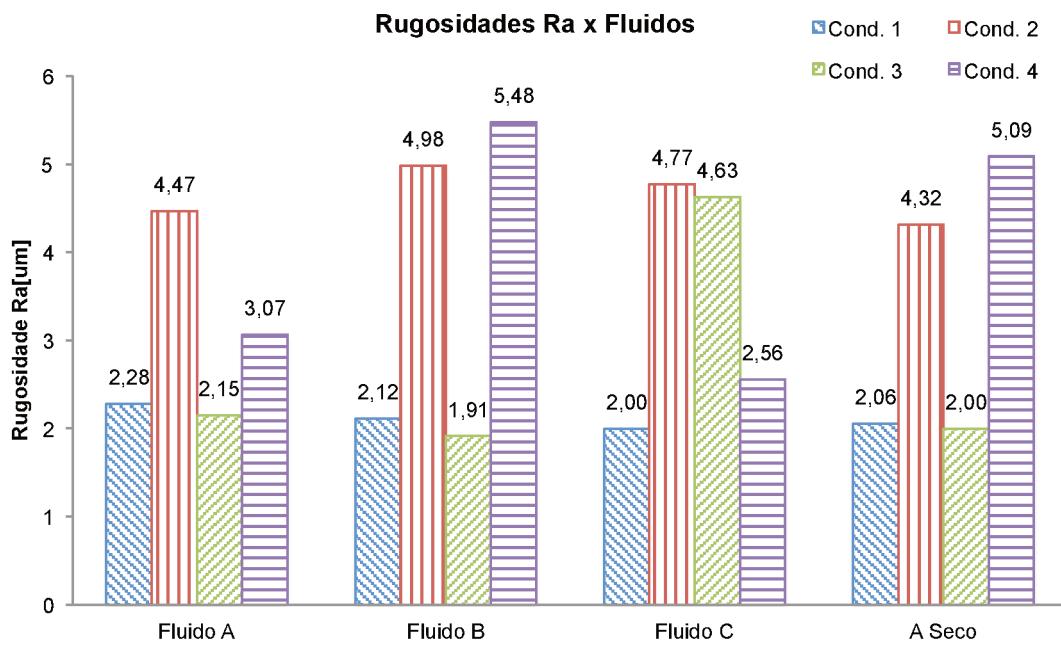


Figura 4.35: Rugosidades R_a , medidas durante os ensaios em cada condição

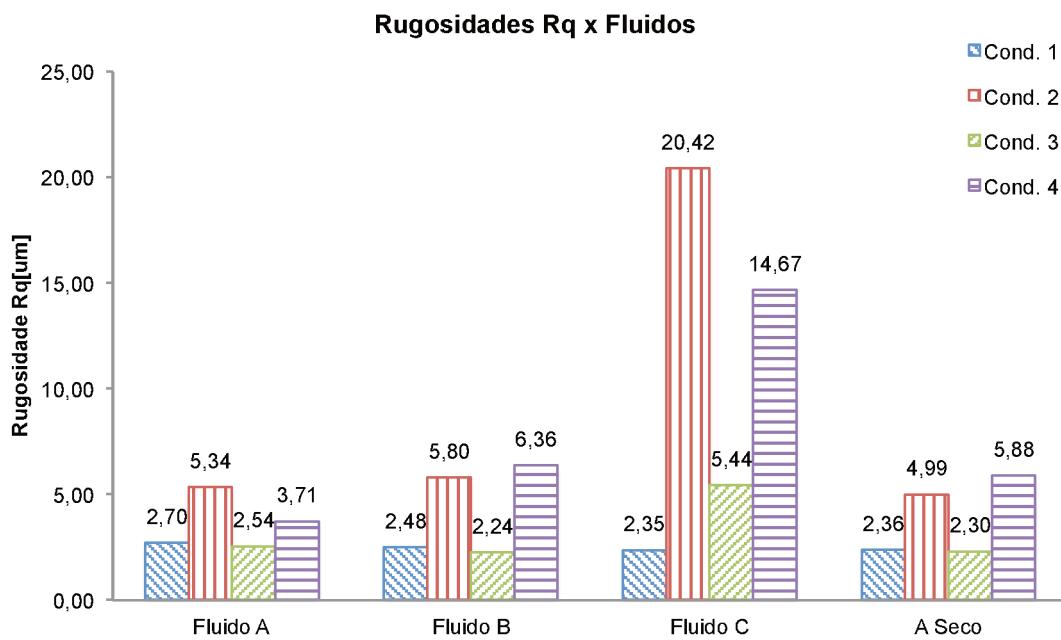


Figura 4.36: Rugosidades R_q medidas durante os ensaios em cada condição

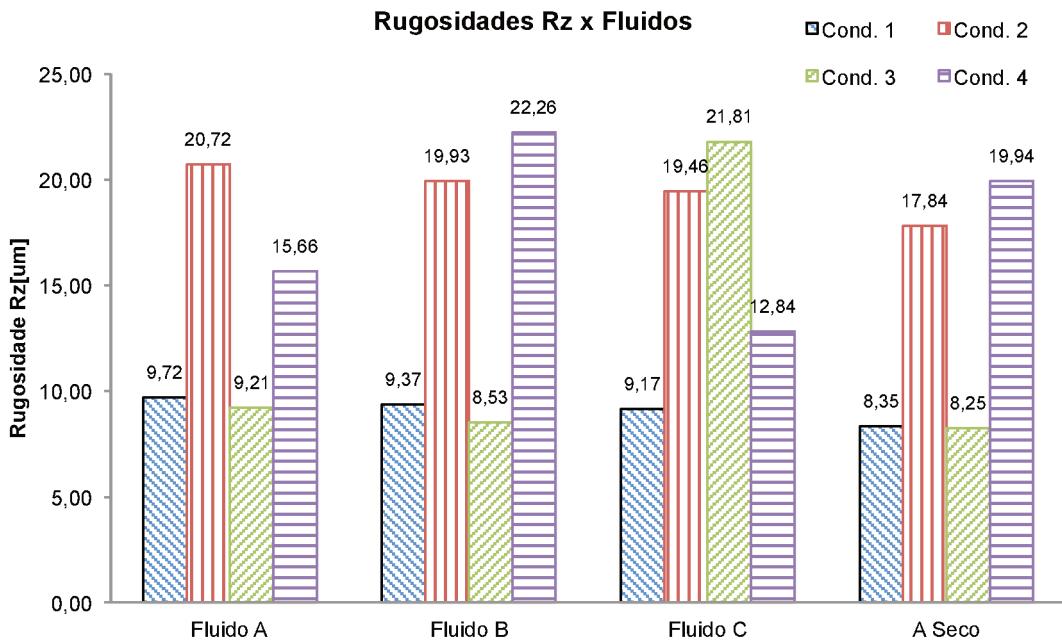


Figura 4.37: Rugosidades R_z medidas durante os ensaios em cada condição.

Como é possível observar, de maneira geral, as rugosidades foram maiores quando a usinagem era realizada usando-se os maiores valores de avanço da ferramenta ($f = 0,32\text{mm/rot}$). O gráfico da figura 4.39 contém os valores das rugosidades R_a medidas após a primeira passada da ferramenta na peça, quando a ferramenta ainda não apresentava nenhum desgaste, para comparar os valores obtidos.

A partir da análise do gráfico da figura 4.39, é possível constatar que as rugosidades R_a são maiores nas condições de corte que usam maiores valores de avanço ($f = 0,32\text{ mm/rot}$), que são as condições 2 e 4, pois a rugosidade é altamente influenciada pelo avanço da ferramenta (MACHADO et al., 2015). O aumento da velocidade de corte de 200 m/min para 350 m/min alterou a rugosidade de maneira diferente, dependendo da condição lubri-refrigerante e do avanço utilizados. As rugosidades médias R_a , na primeira condição de corte, foram ligeiramente menores do que as observadas nas outras condições de corte.

O menor valor de R_a medido após a primeira condição de corte foi encontrado na usinagem a seco e o maior encontrado na usinagem com o fluido de corte B (semissintético de base mineral) e foi 14% maior. Este mesmo comportamento se repetiu quando a usinagem foi feita na segunda condição de

corte ($v_c = 200 \text{ m/min}$ e $f = 0,32 \text{ mm/rot}$), e a diferença entre R_a da usinagem feita a seco e da usinagem com fluido de corte B foi 18%. Na condição 3 ($v_c = 350 \text{ m/min}$ e $f = 0,2 \text{ mm/rot}$) o menor valor do parâmetro de rugosidade R_a foi obtido com aplicação do fluido de corte B (semi-sintético de base mineral) e a diferença entre esse valor e o maior valor de R_a , encontrado na usinagem com o fluido de corte C, foi de 18%. Na quarta condição ($v_c = 350 \text{ m/min}$ e $f = 0,32 \text{ mm/rot}$) o menor R_a foi apresentado quando utilizando o fluido de corte C (sintético de base vegetal), e a diferença entre esse valor e o maior valor encontrado (na usinagem com fluido de corte B), foi de 57%, a maior diferença entre valores encontrada neste estudo.

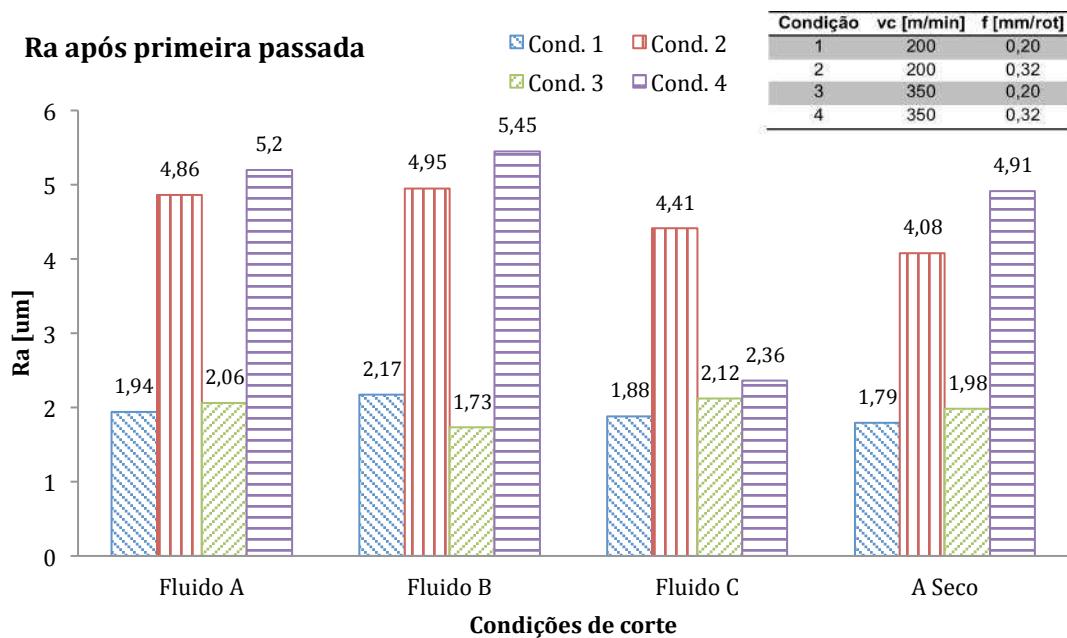


Figura 4.38: Comparação das rugosidades médias R_a nas diferentes condições de corte, após somente uma passada da ferramenta de corte sobre a peça.

Comparando-se somente os ensaios feitos com os fluidos de corte, os valores de R_a foram menores quando o fluido C foi utilizado, exceto na condição 3, onde o fluido de corte B foi melhor que o C. O fluido de corte, quando na sua função de lubrificante, atua reduzindo o atrito entre a ferramenta e a peça ou o cavaco e o desgaste da ferramenta; entretanto, quando atuando na sua função de refrigerante, faz com que a resistência ao cisalhamento do

material aumente, o que aumenta a força de usinagem, e, consequentemente, prejudica o acabamento superficial da peça (MACHADO *et al.*, 2015).

Os parâmetros de rugosidade R_a estiveram sempre abaixo de 6 μm . As rugosidades observadas foram menores quando a usinagem foi realizada a seco nas duas primeiras condições de corte (velocidade de corte menor), indicam que nesta condição a ação refrigerante do fluido pode ter atuado para prejudicar o acabamento em proporções maiores que a ação positiva de lubrificação. Entretanto, nas condições 3 e 4 (de maior velocidade de corte) a ação conjunta de refrigeração e lubrificação foram mais favoráveis quando se utilizou os fluidos B e C, respectivamente. Na comparação somente dos valores de R_a obtidos quando as peças foram usinadas usando fluido de corte, as peças usinadas com o fluido de corte C, que é um fluido sintético de base vegetal, tiveram menores valores de rugosidades em praticamente todas as condições (exceção da condição 3). Este fluido de corte foi o que apresentou menores tempos de vida da ferramenta (sendo, portanto, um fluido com menor lubricidade em comparação com os outros dois), menor valor de coeficiente de troca de calor (h) (configurando um fluido com menor capacidade refrigerante), um valor alto de ângulo de contato no ensaio de molhabilidade (sendo portanto um fluido de difícil espalhamento); tratando-se, portanto, de um fluido com menores capacidades lubrificante e refrigerante do que os outros dois fluidos testados nos ensaios realizados neste trabalho. Ainda assim, a qualidade superficial das peças usinadas quando a usinagem foi feita usando este fluido ficou melhor, possivelmente com ação conjunta refrigerante e lubrificante mais apropriada que as oferecidas pelos demais fluidos.

No ensaio de atrito *reciprocating* o fluido de corte C (sintético de base vegetal) apresentou um coeficiente de atrito alto em relação ao dos outros fluidos, apesar de não ter sido o maior coeficiente de atrito medido, e o filme de fluido rompeu-se com a segunda maior carga aplicada, além de ter o segundo maior tempo para que o filme se rompesse. O resultado deste ensaio explica o comportamento do fluido de corte C no ensaio de torneamento, pois este fluido demonstrou uma melhor capacidade de lubrificação, já que o filme de fluido formado foi mais estável e não se rompeu com facilidade. Isso foi provavelmente o que fez com que o acabamento da peça ficasse melhor nas condições 1, 2 e 4.

Os valores das rugosidades da peça usinada com o fluido A e com o fluido B ficaram próximos, mas a qualidade da superfície gerada na usinagem com o fluido B ficou ligeiramente pior, exceto na condição 3. A partir da comparação com o ensaio de atrito *reciprocating*, o fluido A gerou um coeficiente de atrito um pouco maior do que o coeficiente do fluido de corte B, mas este foi o fluido de corte que levou o maior tempo para que o filme fosse rompido, e suportou a maior carga também. Este fato significa que o fluido de corte B, de base mineral, apesar de ter se mostrado um fluido mais estável, e mesmo tendo um baixo coeficiente de atrito, só apresentou acabamento superficial melhor que os demais, na condição 3. Dos três fluidos testados (na concentração de 7%), o fluido de corte B foi o que apresentou maior ângulo de contato no ensaio de molhabilidade. A explicação, portanto para a baixa qualidade superficial da peça usinada nas condições 1, 2 e 4 pode residir no fato do fluido de corte B ter mais dificuldade em se espalhar sobre a superfície da ferramenta, o que prejudica a lubrificação e, consequentemente, a qualidade da superfície formada. A rugosidade produzida na peça é, portanto, uma combinação da ação lubrificante (que tende a diminuir a rugosidade) com a capacidade refrigerante (que tende a aumentar a rugosidade) dos fluidos de corte. O mesmo comportamento pode ser observado nas rugosidades R_q e R_z , como pode ser observado nos gráficos das figuras 4.33 a 4.36.

4.7. RESUMO DOS RESULTADOS

A tabela 4.4 mostra os ranqueamentos (classificação) das condições lubri-refrigerantes a partir dos resultados alcançados nos ensaios ao longo do trabalho. São apresentadas as ordens de classificação em cada teste, sendo 1 para o “melhor” resultado e 4 para o “pior” resultado encontrado, quando aplicando os fluidos na concentração de 7%. Já a tabela 4.5 mostra um ranqueamento também, mas com os resultados obtidos nos ensaios realizados em três concentrações, 3%, 7% e 10%, sendo, da mesma forma, atribuído o valor 1 para a melhor performance alcançada e 10 para a pior.

Tabela 4.4. Ranqueamento dos resultados encontrados (ensaios feitos com fluidos em somente uma concentração, 7%)

Ensaio	Fluido A	Fluido B	Fluido C	A seco
Crescimento microbíológico	3	2	1	-
Vida da ferramenta	1	2	3	4
Temperatura de usinagem	3	2	1	4
Rugosidade	3	4	1	2

Tabela 4.5. Ranqueamento dos resultados encontrados (ensaios feitos com fluidos nas três concentrações)

	Fluido A			Fluido B			Fluido C			A seco
	3%	7%	10%	3%	7%	10%	3%	7%	10%	
Reciprocating	7	9	8	4	1	5	6	2	3	-
Capacidade refrigerante	4	5	7	6	2	3	1	8	9	10
Coeficiente <i>h</i>	4	5	7	6	2	3	1	8	9	10
Molhabilidade	5	2	1	9	7	4	8	3	6	-
Viscosidade	7	8	9	1	3	5	2	4	6	-
Força de usinagem (<i>v_c</i>)	5	3	8	6	2	10	7	4	9	1
Força de usinagem (<i>f</i>)	6	2	8	5	1	10	7	3	9	4

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

CARACTERIZAÇÃO DOS FLUIDOS:

Propriedade Lubrificante – Ensaio *Reciprocating*:

No ensaio de desgaste por deslizamento tipo “starving” (*reciprocating*), o fluido de corte A (emulsionável de base vegetal) apresentou os menores valores dos coeficientes de atrito medidos, nas três concentrações, configurando o melhor comportamento lubrificante neste ensaio. Apesar disso, o filme formado na interface suportou as menores cargas e se rompeu nos menores tempos, em comparação com os outros fluidos, nas três concentrações estudadas.

Propriedade Refrigerante – Curva de Resfriamento

O fluido de corte C (sintético de base vegetal) na concentração de 10% foi o que levou o maior tempo para refrigerar o corpo de prova aquecido durante os ensaios, e obteve o menor valor calculado do coeficiente de troca de calor por convecção (h), considerado portanto, o fluido com o pior desempenho entre os fluidos testados. O fluido com a melhor capacidade de resfriamento, usando-se como parâmetro o valor do coeficiente de troca de

calor por convecção h foi o mesmo fluido de corte C, porém na concentração de 3%.

Molhabilidade

O fluido de corte que apresentou o menor ângulo médio de contato foi o fluido de corte A (emulsionável de base vegetal) na concentração de 10%, o que significa que este fluido molha mais a superfície do que os outros fluidos testados. Essa característica confere um melhor espalhamento do fluido sobre a superfície, e, consequentemente, pode melhorar as capacidades de lubrificação e refrigeração do fluido. Além disso, o fluido que obteve o maior ângulo de contato médio no ensaio foi o fluido de corte B (semissintético de base mineral) na concentração de 3%.

Viscosidade

As maiores viscosidades medidas no ensaio foram as dos fluidos de corte A (emulsionável de base vegetal), nas três concentrações, sendo a maior delas na concentração de 10%. Apesar disso, esses fluidos apresentaram as melhores capacidades de espalhamento entre os fluidos testados.

Crescimento microbiológico “*in vitro*”

O fluido de corte C (sintético de base vegetal) demorou mais para apresentar crescimento microbiano, configurando um ambiente menos propício ao desenvolvimento de bactérias. Após atingir o valor máximo de microrganismos no ambiente, a curva de crescimento microbiológico dos três fluidos de corte teve um comportamento parecido, com a queda do crescimento acontecendo praticamente ao mesmo tempo nos três. A viscosidade dos fluidos de corte B e C obtiveram aumentos nos seus valores após a contaminação, mas a viscosidade do fluido A sofreu uma diminuição. A massa específica dos três fluidos de corte foi maior após a contaminação.

ENSAIOS DE USINAGEM

Forças de usinagem

As forças de usinagem foram maiores quando se utilizou o fluido de corte C (sintético de base vegetal), nas três concentrações testadas, quando se variou a velocidade de corte e o avanço da ferramenta. Isso se explica pelo seu maior poder refrigerante, percebido pelos valores dos coeficientes de troca de calor calculados após o ensaio de resfriamento, o que diminui a temperatura na região de corte, aumentando a resistência do material ao cisalhamento e dificultando a remoção do material.

Vida e Desgaste das ferramentas

As ferramentas duravam mais tempo quando usinando com as menores velocidades de corte e menores avanços, e o tempo de vida foi maior durante a usinagem com o fluido de corte A, o que pode ser explicado pela sua maior capacidade lubrificante, comprovada no ensaio reciprocating e de molhabilidade, e devido às suas moléculas polares formarem uma película mais firme e mais difícil de ser quebrada.

As formas de desgaste presentes em todas as ferramentas utilizadas nos ensaios de vida das ferramentas foram o desgaste de flanco e o desgaste de cratera. O mecanismo de desgaste predominante em todas as condições lubri-refrigerantes foi o desgaste abrasivo e adesivo (*attrition*), comprovado por análises feitas no MEV.

Rugosidades

As rugosidades R_a , R_q e R_z se mostraram maiores quando a usinagem era feita com maiores valores de avanços, e mostraram-se menores durante a usinagem a seco, o que significa que a ação refrigerante de todos os fluidos predominaram sobre a ação lubrificante durante os ensaios. Na comparação dos fluidos, o fluido de corte C (sintético de base vegetal) propiciou menores valores de rugosidades, e, portanto, um melhor acabamento superficial da peça usinada, apesar de ter sido considerado (após os ensaios realizados) um fluido

de corte com menores capacidades lubrificante e refrigerante do que os outros dois fluidos de corte testados.

Temperatura de usinagem

No ensaio de temperatura pelo método do termopar ferramenta-peça, a maior diferença entre as temperaturas de usinagem foi encontrada quando usou-se a velocidade de corte mais alta, $v_c = 250m/min$, durante a usinagem a seco, e a menor temperatura com a utilização do fluido de corte C (sintético de base vegetal). Isso se deve ao fato do fluido de corte C ter uma melhor capacidade de troca de calor, explicado pelos valores dos coeficientes de troca de calor por convecção calculados no ensaio da curva de resfriamento.

Considerando, portanto todos os resultados obtidos, pode-se concluir que o fluido emulsionável de base vegetal (fluido A) tem melhor capacidade lubrificante do que o de base mineral (fluido B) e do que o sintético de base vegetal (fluido C), já que proporcionou menores forças de usinagem, maiores vidas das ferramentas, e consequentemente menores desgastes, e apesar dos acabamentos superficiais não terem sido melhores que os dos outros dois fluidos. Tudo isso deve-se à sua maior capacidade de lubrificação, comparada aos fluidos testados neste trabalho.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar o comportamento de outros fluidos de corte, de outros fabricantes para comparar com os resultados obtidos neste trabalho.
- Estudar o comportamento dos fluidos de corte sujeitos a contaminação para comparação com os resultados obtidos sem contaminação microbiológica, fazendo ensaios de força, vida da ferramenta e temperatura de usinagem.
- Realizar ensaios para medição da potência durante a usinagem com fluidos de corte de base vegetal e de base mineral.
- Comparar diferentes formulações de fluidos no que diz respeito a todas a variáveis estudadas, como por exemplo, fluidos emulsionáveis de base vegetal de diferentes fabricantes, ou cujo óleo-base seja proveniente de diferentes vegetais.

REFERÊNCIAS

- ALVES, S. M. Development of new cutting fluid for grinding process adjusting mechanical performance and environmental impact, p. 179-189, 2006.
- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. **Relatório Técnico No 2/2016/SBQ/CPT – DF: Panorama Dos Óleos Básicos No Brasil - Projeto: Revisão Das Portarias ANP N° 129/99 e N° 130/99.** Brasília - DF. 2016. (no. 2/2016/SBQ/CPT).
- ARAÚJO JUNIOR , S. et al. Lubri-cooling and tribological behavior of vegetable oils during milling of AISI 1045 steel focusing on sustainable manufacturing. **Journal of Cleaner Production** , n. 156, p. 635-647 , 18 abr. 2017.
- ARRUDA, O. S. et al. **Dispositivo para controle da contaminação microbiana dos fluidos de corte com utilização de baixa temperatura.** [S.I.]. 2007. (Depósito MU8701828-4).
- ASTM D2270-10. **Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 °C and 100 °C.** West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- ASTM D445-97. **Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (the Calculation of Dynamic Viscosity).** West Conshohocken: ASTM International, 2001.
- ASTM D7042. **Standard Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity).** West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- ASTM E2275-13. **Standard Practice for Evaluating Water-Miscible Metalworking Fluid Bioresistance and Antimicrobial Pesticide Performance.** West Conshohocken: ASTM International, 2013.

- BAIN & COMPANY. **Estudo Do Potencial De Diversificação Da Indústria Química Brasileira: Relatório Final.** BNDES. São Paulo. 2014.
- BARTZ, W.; RUDNICK, L. Comparison of synthetic, mineral oil, and bio-based lubricant fluids in synthetics, mineral oils, and bio-based lubricants. **CRC Press**, 2005.
- BELLUCO, W.; DE CHIFFRE, L. Surface integrity and part accuracy in reaming and tapping stainless steel with new vegetable based cutting oils. **Tribology International**, n. 35, p. 865-870, 2002.
[https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(02\)00093-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00093-2)
- BENNET, E. O. The biology of metalworking fluid. **Journal of American Society of Lubrication Engineers**, v. 289, n. 6, p. 237-247, 1972.
- BENNET, E. O. Water based cutting fluids and human health. **Tribology International**, p. 45-60, 1983.
- BESSE, J. Getting The Most From Creep-Feed Grinding. **Modern Machine Shop**, 15 nov. 2005. Disponível em: <www.mmsonline.com/articles/getting-the-most-from-creep-feed-grinding>. Acesso em: 16 jun. 2010.
- BIANCHI, E. C. et al. **Control of microbial contamination in metal working fluids at low temperatures.** Fórum Ambiental da Alta Paulista. [S.I.]: [s.n.]. 2009.
- BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; PIUBELI, B. A. **Aplicação e Utilização dos Fluidos de Corte nos Processos de Retificação.** São Paula: Artliber, 2003.
- BIANCHI, E. O. et al. **Crescimento microbiano nos fluidos de corte controlado por radiação ultravioleta.** Fórum Ambiental Paulista. [S.I.]: [s.n.]. 2008.
- BRINKSMEIER , E. et al. **Metalworking fluids—Mechanisms and performance.** CIRP Annals - Manufacturing Technology. [S.I.]: Elsevier. 2015. p. 605-628.
- BURTON, G. et al. Use of vegetable oil in water emulsion achieved through ultrasonic atomization as cutting fluids in micro-milling. **Journal of Manufacturing Processeses**, n. 16, p. 405–413 , maio 2014.

- BYRNE, G. Usinagem em ambiente limpo: não se trata apenas de uma questão de higiene. **Revista Máquinas e Metais**, v. 363, n. 4, p. 66-80, 1996.
- CHETAN; GHOSH, S.; RAO , V. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. **Journal of Cleaner Production** , n. 100, p. 17-34, 20 mar. 2015.
- CHINCHANIKAR, S. et al. Comparative Evaluations of surface roughness during hard turning under dry and with water-based and vegetable oil-based cutting fluids. **Procedia Materials Science**, n. 5, p. 1966-1975, 2014.
- COSTA, E. S. **FURAÇÃO DE AÇOS MICROLIGADOS COM APLICAÇÃO DE MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO DE CORTE - (MQF)**. Uberlândia : Universidade Federal de Uberlândia, 2004. Tese de Doutorado.
- DA SILVA, L. R. **Estudo da geometria da aresta de corte de ferramentas aplicadas ao torneamento de superligas à base de níquel com alta velocidade de corte**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 2002. Tese de Doutorado.
- DA SILVA, M. B.; WALLBANK, J. Lubrication and Application Method in Machining. **Industrial Lubrication and Tribology**, v. 50, n. 4, p. 149-152, 1998. <https://doi.org/10.1108/00368799810225082>
- DA SILVA, R. B. **Performance of different cutting tool materials in finish turning of ti-6al-4v alloy with high pressure coolant supply technology**. Uberlândia : Universidade Federal de Uberlândia, 2006. Tese de Doutorado.
- DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **Journal of Cleaner Production**, n. 83, p. 33-47, 12 ago. 2014.
- DEMIRBAS, E.; KOBYA ,. Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. **Process Safety and Environmental Protection** , n. 105, p. 79-90, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.013>

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 & Manufacture**, n. 47, p. 748–753, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.017>

DINIZ, A. E. et al. Fluidos de corte em usinagem. In: TALENTOS, N. **Tecnologias Avançadas de Manufatura**. São Paulo: Coleção Fábrica do Milênio, v. 1, 2005. p. 47-64.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. . **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 6.ed. ed. São Paulo: [s.n.], v. 1, 2008. 262 p.

ELMUNAFI , H. S.; KURNIAWAN , ; NOORDIN , M.. **Use of Castor Oil as Cutting Fluid in Machining of Hardened Stainless Steel with Minimum Quantity of Lubricant**. 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing. [S.I.]: Procedia CIRP. 2015. p. 408-411.

EZUGWU, E. O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace alloys. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, n. 45, p. 1353-1367, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.02.003>

EZUGWU, E. O. et al. The Effect of Argon Enriched Environment in High Speed Machining of Titanium Alloy. **Tribology Transactions**, n. 48, p. 18-23, 2005. <https://doi.org/10.1080/05698190590890290>

FERNANDES, J. R. S.; MACHADO, A. R. **Determinação da Influência do Comprimento de Contato Cavaco/Ferramenta na Temperatura de Corte**. Relatório de Iniciação Científica DIRPE no. 052/92. [S.I.]. 1993.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: [s.n.], 1977.

FINZI, M. B. A. **Microbioma do fluido de corte utilizado na indústria metal-mecânica brasileira**: composições quantitativa e qualitativa, fatores que influenciam a presença de microrganismos, biodegradação e impacto nas propriedades lubri-refrigerante. Uberlândia : Universidade Federal de Uberlândia, 2015. 87 p. Tese de Doutorado.

- FINZI, M. B. A. **Estudo do desempenho de fluidos de corte nos processos de usinagem.** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2017. Tese de Doutorado.
- GOMES, J. O.; CARVALHO, M. V. . F. D. F. **Manual de gerenciamento de fluidos de corte.** Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos - SP. 2005. Manual.
- GOMES, R. C. et al. **Correlação entre baixas temperaturas e o controle da contaminação microbiana nos fluidos de corte.** 4o Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Águas de São Pedro - SP: [s.n.]. 2007. p. 1-8.
- GROOVER, M. P. **Introdução aos Processos de Fabricação.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2014.
- GROSSI , M.; RICCÒ , B. An automatic titration system for oil concentration measurement in metalworking fluids. **Measurement**, n. 97, p. 8-14, 05 nov. 2016.
- GRUB, A. M. **Avaliação do Desempenho de Fluidos de Corte Contaminados no Processo de Torneamento do Aço Inoxidável Austenítico V304UF.** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2013. Dissertação de Mestrado.
- HADAD, M.; SADEGHI, B. Minimum Quantity lubrication – MQL turning of AISI 4140 steel alloy. **Journal of Cleaner Production**, n. 54, p. 332-343, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.011>
- HOWES, T. D.; THÖNSHOFF, H. K.; HEUER. Environmental aspects of grinding fluids. **Annals of the CIRP**, n. 40, fev. 1991.
- HUESMANN-CORDES, A. G. et al. Influence of Additives in Metalworking Fluids on the Wear Resistance of Steels. **Procedia CIRP**, p. 108-113, 2014.
- IGNÁCIO, E. A. **Caracterização da legislação ambiental brasileira voltada para a utilização de fluidos de corte na indústria metal-mecânica.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1998. Dissertação de Mestrado.
- INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 6. ed. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

IOWA WASTE REDUCTION CENTER. **Cutting fluid Management for Small Operations: A practical pollution prevention guide.** University of Northern Iowa. [S.I.]. 2003. 3.ed.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren:** Drehen, Fräsen und Bohren. 5. ed. Berlim – Heidelberg: [s.n.], 1997. 1471 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-07204-2>

KLIN & COMPANY, INC. **Competitive intelligence for the global lubricants industry.** Kline & Company, Inc. [S.I.], p. 204-214. 2006.

KOCH , ; PASSMAN , ; RABENSTEIN ,. Comparative study of microbiological monitoring of water-miscible metalworking fluids. **International Biodeterioration & Biodegradation**, n. 98, p. 19-25, mar. 2015.

KOVACEVIC, R.; CHERUKUTHOTA, C.; MOHAN, R. Improving Milling Performance with High Pressure Waterjet Assited Cooling/Lubrication. **Journal of Engineering for Industry**, n. 19, p. 331-339, 1995.
<https://doi.org/10.1115/1.2804338>

KRAJNIK, P. et al. Transitioning to sustainable production e part III: developments and possibilities for integration of nanotechnology into material processing technologies. **Journal of Cleaner Production**, n. 112, p. 1156-1164, 24 ago. 2015.

KRISHNA, P. V.; SRIKANT, R. R.; RAO, D. N. Experimental investigation on the performance of nanoboric acid suspensions in SAE-40 and coconut oil during turning of AISI 1040 steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, n. 50, p. 911-916, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.06.001>

KURAM, E. et al. **Effects of the cutting fluid types and cutting parameters on surface roughness and thrust force.** World Conference of Engineering. London - UK: [s.n.]. 2010.

KURAM, E. et al. **Optimization of the cutting fluids and parameters using Taguchi and ANOVA in milling.** World Conference of Engineering. London - UK: [s.n.]. 2010.

- KURAM, E.; OZCELIK, B.; DEMIRBAS, E. Environmentally Friendly Machining: Vegetable Based Cutting Fluids. **Green Manufacturing Processes and Systems, Materials Forming**, n. 23, p. 23-47, 2013.
- KURODA, M. Aumentando a lucratividade com óleos vegetais. **O Mundo da Usinagem**, n. 3.ed., 2006. 14-15.
- LAUTERBACH, W. E. Influence of Point of Application of Cutting Oil on Tool Life. **Lubrification Engineering**, jun. 1952. 135-136.
- LAWAL, A.; CHOUDHURY , ; NUKMAN , Y. Evaluation of vegetable and mineral oil-in-water emulsion cutting fluids in turning AISI 4340 steel with coated carbide tools. **Journal of Cleaner Production** , n. 66, p. 610-618, 03 dez. 2013.
- LAWAL, S. A. A review of application of vegetable oil-based cutting fluids in machining non-ferrous metals. **Indian Journal of Science and Technology**, n. 6, p. 3951-3956, 2013.
- LAWAL, S. A.; CHOUDARY, I. A.; NUKMAN, Y. Application of vegetable oil-based metal working fluids in machining ferrous metals—a review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, n. 52, p. 1-12, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.09.003>
- LOTIERZO, A. et al. Insight into the role of amines in Metal Working Fluids. **Corrosion Science**, -, n. 110, p. 192-199, 26 abr. 2016.
- MACHADO, A. R. **Machining of Ti6Al4V and Inconel 901 with a high pressure coolant system**. Coventry: University of Warwick, 1990. 288 p. PhD Thesis.
- MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3.ed. ed. São Paulo: [s.n.], 2015. 384 p.
- MACHADO, A. R.; SILVA, M. M. Fluidos de Corte para HSM. In: MARCONDES, F. C.; BORGES NETTO, A.; TANIO, F. H. **Usinagem em Altíssimas Velocidades de Corte**. 1. ed. ed. São Paulo: Érica, 2003. p. 49-81.
- MACHADO, A. R.; WALLBANK, J. The Effect of Extremely Low Lubricant Volumes in Machining. **Wear**, n. 210, p. 76-82, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00059-8)

MANG, T.; BOBZIN, K.; BARTELS, T. **Industrial Tribology - Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication.** Weinheim: [s.n.], 2010. 644 p. <https://doi.org/10.1002/9783527632572>

MANG, T.; WILFRIED, D. **Lubricants and Lubrication.** [S.I.]: KGaA, 2007.

MANNEKOTE , J. et al. Environmentally friendly functional fluids from renewable and sustainable sources-A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , jun. 2017. Article in Press.

MARQUES, A. **Torneamento de Inconel 718 com aplicacao de lubrificantes sólidos.** Uberlândia : Universidade Federal de uberlândia, 2015. 226 p. Tese de Doutorado.

MEYER , D.; REDETZKY , M.; BRINKSMEIER , E. Microbial-based metalworking fluids in milling operations. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, n. 66, p. 129–132, 24 abr. 2017.

MEYER , D.; WAGNER , A. **Influence of metalworking fluid additives on the thermal conditions in grinding.** CIRP Annals - Manufacturing Technology. [S.I.]: Elsevier. 2016. p. 313-316.

MURAT, J. B. Factors influencing the microbial composition of metalworking fluids and potential implications for machine operator's lung. **Applied Environmental Microbiology**, n. 78, p. 34-41, 2012.
<https://doi.org/10.1128/AEM.06230-11>

MURRAY, P. R. **Microbiologia Médica.** 4.ed. ed. [S.I.]: [s.n.], 2004.

NAJIHA , M. S.; RAHMAN , M. M.; YUSOFF , A. R. Environmental impacts and hazards associated with metal working fluids and recent advances in the sustainable systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , n. 60, p. 1008-1031, jul. 2016.

NAVES, V. T. G. **Usinagem do aço inoxidável austenítico ABNT 316UF com aplicação de fluido de corte a alta pressão.** Uberlândia : Universidade Federal de Uberlândia, 2013. 181 p. Tese de Doutorado.

NBR ISO 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade:** método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade. [S.I.]: ABNT, 2002.

- NELSON, D.; SCHAILBLE, J. Update: Cutting Fluids and Related Products. **Cutting Tool Engineering**, p. 31-35, 1988.
- NETTO, C. G. A última forma. **Jornal da Unicamp**, Campinas, n. 298, 22 ago. 2005. 11. Disponível em: http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/agosto2005/ju298pag11.html.
- NORMA ISO 3685. **Tool life testing with single-point turning tools**. [S.I.]: [s.n.], 1993. 42 p.
- OLIVEIRA JÚNIOR, M. M. **Lubrificação sólida em meio fluido**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2013. 94 p. Dissertação de Mestrado.
- OSAMA, M. et al. Recent developments and performance review of metal working fluids. **Tribology International**, n. 114, p. 389-401, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.04.050>
- OZCELIK, B. et al. Experimental investigations of vegetable-based cutting fluids with extreme pressure during turning of AISI 304L. **Tribology International**, n. 44, p. 1864-1871, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.07.012>
- PADMINI, R.; KRISHNA, P. V.; RAO, G. K. M. Performance assessment of micro and nano solid lubricant suspensions in vegetable oils during machining. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, 2014.
- PADMINI, R.; KRISHNA, P. V.; RAO, G. K. M. Effectiveness of vegetable oil based nanofluids as potential cutting fluids in turning AISI 1040 steel. **Tribology International**, n. 94, p. 490-501, fev. 2016.
- PASSMAN, F. J. Microbial problems in metalworking fluids. **Journal of the society of tribologists and lubrication engineers**, p. 431-433, 1988.
- PASSMAN, F. J.; ROSSMOORE, H. W. Reassessing the health risks associated with employee exposure to MWF microbes. **Lubrication Engineers**, n. 58, p. 30-38, 2002.
- PAUWELS, A. World lubricants consumption to reach 10.5 billion gallons by 2015. **Zawya**, 2011. Disponivel em:

- <<http://www.zawya.com/story/ZAWYA20110427082414/>>. Acesso em: 03 fev. 2013.
- PHADKE, M. Global lubricant consumption – Where are we going? **Kline Research**, 2012. Disponível em: <<http://www.klinegroup.com/blogs/index.php/2012/01/04/global-lubricant-consumption-/>>. Acesso em: 03 fev. 2013.
- RAO, S. N.; SATYANARAYANA, B.; VENKATASUBBAIAH, K. Experimental investigation of microbial contamination of nano cutting fluids with CNT inclusion. **Global Journal of Research in Engineering**, v. 11, n. 4, 2011.
- ROSSMOORE, H. W. Biostact fluids, friendly and others myths in metalworking microbiology. **JST Lubricating Engineering**, p. 253-260, abr. 1993.
- ROY, M. M.; ORSZULIK, S. **Chemistry and technology of lubricants**. [S.I.]: [s.n.], 2010.
- RUNGE, P. R. F. . D. G. N. **Lubrificantes nas indústrias – produção, manutenção e controle**. Cotia: [s.n.], 1990. 71-171 p.
- SALES, W. F. **Influência das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 1999. 166 p. Tese de Doutorado.
- SALES, W. F.; DINIZ, A. E.; MACHADO, A. R. . Application of Cutting Fluids in Machining Processes. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, v. 23, n. 2, p. 225-240, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-73862001000200009>
- SANTOS, E. D. S. **Desenvolvimento e avaliação tribológica de emulsão o/a a partir de óleo vegetal epoxidado para aplicação em fluidos de corte**. Natal: UFRN, 2014. 84 p. Dissertação de Mestrado.
- SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: [s.n.], 2007. 246 p.
- SCHAMISSO, A. Os cavacos contaminados podem até se tornar sucata rentável. **Máquinas e Metais**, 314, n. 3, 1992. 28-31.
- SCHROETER, R. B. Otimização Do Volume De Fluidos De Corte Nos Processos De Usinagem, 2008. Disponível em:

<http://www.lmp.ufsc.br/linhas_pesquisa/dueco/otim_vol.html>. Acesso em: 29 mar. 2013.

SEVIM, Z. E.; ATANU, A.; BRAJENDRA, K. S. Chemically functionalized vegetable oils in synthetics, mineral oils, and bio-based lubricants. **CRC Press**, 2005.

SHARMA, A. K.; TIWARI, A. K.; DIXIT, A. R. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, n. 127, p. 1-18, 09 abr. 2016.

SHARMA, J.; SIDHU, B. S. Investigation of effects of dry and near dry machining on AISI D2 steel using vegetable oil. **Journal of Cleaner Production**, n. 66, p. 619-623, 25 nov. 2013.

SHASHIDHARA, Y. M.; JAYARAM, S. R. Vegetable oils as a potential cutting fluid - An evolution. **Tribology International**, n. 43, p. 1073-1081, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.065>

SHYHA , ; GARIANI , ; BHATTI , . **Investigation of cutting tools and working conditions effects when cutting Ti-6Al-4V using vegetable oil-based cutting fluids**. The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2015. [S.I.]: Elsevier. 2015. p. 577-584.

SILVA NETO, J. C. **Metrologia e Controle Dimensional**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012. 239 p.

SOUZA, J. F.; GOMES, J. O.; SOUZA, M. C. **Estudo da viabilidade da reutilização de fluido lubrificante em processos das indústrias metal-mecânica**. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. São Luís - MA: ABCM. 2012.

SOUZA, J. F.; GOMES, J.; SOUZA, J. **Análise comparativa de usinabilidade entre três óleos vegetais distintos**. 12o. Colóquio de Usinagem. Uberlândia - MG: Universidade Federal de Uberlândia. 2008.

SRIKANT , R. ; RAMANA , V. S. N. V. Performance evaluation of vegetable emulsifier based green cutting fluid in turning of American Iron and Steel Institute (AISI) 1040 steel e an initiative towards sustainable manufacturing. **Journal of Cleaner Production** , n. 108, p. 104-109, 23 jul. 2015.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. Lubricants and Their Composition. In: _____ **Engineering Tribology**. [S.I.]: [s.n.], 2006. p. 51-101. <https://doi.org/10.1016/B978-075067836-0/50004-3>

TALIB, N.; RAHIM, E. A. The effect of tribology behavior on machining performances when using bio-based lubricant as a sustainable metalworking fluid. **Procedia CIRP**, n. 40, p. 504 – 508 , 2016.

TANIO, F. Usinagem sem refrigeração. **Usinagem Tech**, n. 7, jan. 2012. 8-13. Disponível em: <http://en.calameo.com/read/0006322558f51dbf613c8>.

TEIXEIRA FILHO, F. **A utilização do fluido de corte no fresamento do aço Inoxidável 15-5PH**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2006. Tese de Doutorado.

TEIXEIRA, C. R. **Redução e eliminação de fluidos de corte nos processos de usinagem com ferramentas de corte de geometria definida**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. 2001 p. Tese de Doutorado.

THOMÉ, R. et al. **Estudo microbiológico das micobactérias e fungos contaminantes dos fluidos de corte**. 8o. CIBIM – Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica. Cusco - Peru: [s.n.], 2007.

THORNE, P. S.; SPRINCE, N. Metal working fluids. In: _____ **Textbook of clinical occupational and environmental medicine**. 2.ed. ed. Orlando: [s.n.], 2004.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia**. 10. ed. ed. [S.I.]: [s.n.], 2012.

TRABULSI, L. R. et al. **Microbiologia**. 5. ed. ed. São Paulo: [s.n.], 2008.

TRAFNY, E. A. et al. Microbial contamination and biofilms on machines of metal industry using metalworking fluids with or without biocides. **International Biodeterioration & Biodegradation** , n. 99, p. 31-38, abr. 2015.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4.ed. ed. London: [s.n.], 2000. 446 p.

WOODS, S. Going Green. **Cutting Tool Engineering Magazine**, v. 57, n. 2, fev. 2005.

XAVIOR, M. A.; ADITHAN, M. Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 209, p. 900-909, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.068>