

ANTONIO SANTOS ARAUJO JUNIOR

DESEMPENHO DE ÓLEOS VEGETAIS COMESTÍVEIS
APLICADOS POR MQF NO FRESAMENTO FRONTAL
DO AÇO ABNT 1045



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2013

ANTONIO SANTOS ARAUJO JUNIOR

**DESEMPENHO DE ÓLEOS VEGETAIS COMESTÍVEIS APLICADOS
POR MQF NO FRESAMENTO FRONTAL DO AÇO ABNT 1045**

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

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

UBERLÂNDIA - MG

2013

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

A663d Araujo Junior, Antonio Santos, 1964-
2013 Desempenho de óleos vegetais comestíveis aplicados por MQF no
fresamento frontal do aço ABNT 1045 / Antonio Santos Araujo Junior. -
2013.
162 p. : il.

Orientador: Álisson Rocha Machado.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Fresagem (Trabalhos em metal) -
Teses. 3. Metais - Usinabilidade - Teses. 4. Fluidos de corte - Teses. I.
Machado, Álisson Rocha, 1956- II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dedicatória

Aos meus pais **Antonio Araujo e Marlene Araujo** (in memorian) pela educação a mim atribuída, à minha esposa **Fernanda Araujo** e meu filho **Raphael Araujo** pela compreensão nos momentos de ausência.

Agradecimentos

À Deus por me dar todas as oportunidades presentes na minha vida

Ao Prof. Dr. Álisson Rocha Machado pela orientação ao longo deste período, confiança depositada e permanente incentivo.

Ao Prof. Dr. Antonio Ernandes do IFMA / DMM que possibilitou a realização dos ensaios de medição de força.

Ao colega do Dinter Prof. Msc Tiago Baldêz do IFMA / DMM no auxílio durante os ensaios de usinagem realizados.

Ao Prof. Dr. Keyll Martins do IFMA / DMM, coordenador financeiro por ter acreditado nesse sonho e possibilitado a realização deste projeto de doutorado.

A toda equipe do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) pelo apoio e amizade durante todo tempo de realização do trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Coordenação de Pós - Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, em nome de todos os professores e funcionários que direta e indiretamente contribuíram para a realização desta tese de doutorado.

Ao Instituto Federal do Maranhão (IFMA) / Departamento de Mecânica e Materiais (DMM) pela realização do convênio (Dinter) e pelo apoio material durante a realização dos ensaios.

A CAPES pelo apoio financeiro na forma de bolsa de doutorado.

À empresa Sandvik - Coromant, pela doação das ferramentas de corte utilizadas durante a etapa experimental deste trabalho.

A todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para concretização deste trabalho.

Epígrafe

“Tudo posso naquele que me fortalece, tudo posso em Jesus Cristo”.

Filipenses 4:13

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

Resumo

Buscando alternativas para uma usinagem mais ecológica, e ao mesmo tempo viável tecnicamente, este trabalho investiga a aplicação de óleos comestíveis refinados vegetais (algodão, babaçu, canola, girassol, milho e soja) como fluidos de corte utilizando-se a técnica da Mínima Quantidade de Fluidos (MQF) na usinabilidade do aço ABNT 1045 através do processo de usinagem convencional de fresamento frontal, com ferramentas de metal duro. Diversos ensaios de usinabilidade (força e potência de usinagem, vibração do sistema e acabamento superficial) foram utilizados e os resultados comparados com a aplicação MQF de um óleo industrial comercial de base vegetal, também com a aplicação na forma de jorro de um óleo mineral emulsionável por último com a condição a seco. Os óleos refinados vegetais a base de algodão e a base de canola apresentaram os melhores desempenhos nos ensaios citados, os mesmos foram testados também em ensaios de vida da ferramenta de corte e comparados com a condição a seco e com a aplicação do fluido industrial comercial, também na forma MQF. Monitorou-se o desenvolvimento do desgaste das ferramentas e os mecanismos de desgaste envolvidos foram analisados no MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura. Foi avaliada a vida da ferramenta de corte em função do volume removido de material (VRM), utilizando-se como critério de fim de vida um desgaste médio do flanco ($VB_B = 0,35 \text{ mm}$) conforme norma ISO 8688-1/ 89. Os óleos a base de canola e a base de algodão tiveram um bom desempenho nas condições de baixa e alta velocidade de corte, respectivamente. Verificaram-se também as capacidades de refrigeração e lubrificação e a característica de molhabilidade dos óleos estudados. As curvas de resfriamento mostram uma boa capacidade de retirada de calor dos óleos de canola e algodão, os mesmos apresentaram também uma alta energia específica nos ensaios de riscamento, já nos ensaios de molhabilidade, praticamente todos os fluidos testados apresentaram uma boa aderência à superfície.

Palavras Chave: Fresamento. Fluidos vegetais. MQF. Usinabilidade.

ARAUJO JUNIOR, A. S. **Performance of Edible Vegetable Oils by MQF in Applied Milling Steel Front ABNT 1045**. In 2013.162p. Doctoral Thesis, Federal University of Uberlândia - MG.

Abstract

Searching for a more environmental friendly and at the same time technically viable machining, this work investigates the application of edible refined vegetable oils (cotton, babaçu, canola, sunflower, corn and soybeans) as cutting fluids using by the Minimum Quantity of Fluid (MQF) technique on the machinability of ABNT 1045 steel, in face milling with carbide tools. Firstly, considering the machinability parameters (machining force and power, vibration and surface finish) of the cutting fluids raised in specific tests, the results were compared with those obtained with the MQF application of commercial industrial oil with the flood cooling application of a mineral base soluble oil and dry condition. The two refined vegetable oils that presented the best performance in the previous machinability tests (cotton and canola) were used in tool life trials and compared with the dry condition and with the MQF application of the commercial industrial oil. In these tests the wear of the tools was monitored and the wear mechanisms analyzed at the end of the tool lives within the SEM - Scanning Electron Microscope. We evaluated the life of the cutter depending on the volume of removed material (VRM), using as the criterion of end of life average flank wear ($VB_B = 0.35 \text{ mm}$) as ISO 8688-1 / 89. Among the edible vegetable oils tested best results were found for canola oil to conditions of low shear and cotton under conditions of high shear rate. Some specific tests were carried out to determine the cooling ability, the lubricant ability and the wettability of the studied oils. The cooling curves show a large heat removal capacity of the canola and cotton, and that they also had a high specific energy in the scratching test and the tests of wettability, virtually all fluids tested had a good adhesion to the surface.

Keywords: Milling. Fluids vegetables. MQF. Machinability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Tendência na redução do uso de fluidos de corte (CNTL, 2008).	2
Figura 2.1. Representação esquemática dos processos de conformação dos metais (SCHEY, 1987).	6
Figura 2.2. Tipos de fresas e métodos de fresamentos mais comuns (METAL'S HANDBOOK, 1989).	8
Figura 2.3. Fresamento frontal assimétrico (DINIZ et al. 2006).	9
Figura 2.4. Usinagem por fresamento frontal (POLLI, 2005).	10
Figura 2.5. Eixo motriz fabricado com aço ABNT 1045 (ROLEMAR, 2012).	12
Figura 2.6. Causas geradoras dos efeitos adversos no uso dos fluidos de corte (IGNÁCIO, 1998).	22
Figura 2.7. Efeitos adversos no uso dos fluidos de corte sobre o meio ambiente (IGNÁCIO, 1998).	27
Figura 2.8. Lubricidade dos óleos vegetais e dos óleos minerais (CUTTING TOOL ENGINEERING MAGAZINE, 2005).	29
Figura 2.9. Estrutura geral de um triacilglicerol (LEHNINGER et al, 2011).	31
Figura 2.10. Processo de extração de óleos vegetais (BATISTA et al, 1999).	33
Figura 2.11. Processo de refino de óleos vegetais (BATISTA et al, 1999).	33
Figura 2.12. Fórmula estrutural do ácido graxo saturado (LEHNINGER et al, 2011).	37
Figura 2.13. Fórmula estrutural do ácido graxo monoinsaturado (LEHNINGER et al, 2011).	38
Figura 2.14. Fórmula estrutural do ácido graxo poliinsaturado linoleico e linolênico, (LEHNINGER et al, 2011).	38
Figura 2.15. Direções possíveis de aplicação do fluido de corte (FERNANDES, 2007).	40
Figura 2.16. Aplicações de fluidos de corte: a) Alta Pressão, b) Jorro, c) MQF (FERNANDES, 2007).	41
Figura 2.17. Fresamento com utilização da técnica MQF (CIMM, 2009).	45
Figura 3.1. Fluxograma das etapas experimentais realizadas.	47
Figura 3.2. Corpos de prova utilizados nos ensaios de força, potência, vibração e acabamento superficial.	52
Figura 3.3. Corpos de prova utilizados nos ensaios de vida da ferramenta de corte.	53
Figura 3.4. Detalhe da retirada da amostra na peça, escolha das seções para análise metalográfica.	53
Figura 3.5. Detalhe e identificação das seções escolhidas para análise; Seção 1 - perpendicular (ou transversal) e Seção 2 - paralela (ou longitudinal) à direção de laminação da barra.	54
Figura 3.6. Amostras embutidas em baquelite prontas para serem lixadas e polidas.	54

Figura 3.7. Microestrutura das seções do aço ABNT 1045 (ataque a Nital 2%).	55
Figura 3.8. Gráfico do ensaio de dureza do material.	55
Figura 3.9. Corpo de prova utilizado no ensaio de tração.	56
Figura 3.10. Curvas Tensão - Deformação convencional.	56
Figura 3.11. Máquina - Ferramenta utilizada nos ensaios.	57
Figura 3.12. Ferramenta (fresa / cone) utilizada nos ensaios.	58
Figura 3.13. Inserto utilizado nos experimentos (SANDVIK COROMANT, 2011).	59
Figura 3.14. Equipamentos auxiliares para mensurar o desgaste médio de flanco (VB_B) e analisar o mecanismo de desgaste das ferramentas de corte.	60
Figura 3.15. Aplicador de micro-lubrificação (MQF).	60
Figura 3.16. Sistema de aquisição das forças de usinagem (F_x , F_y , F_z).	62
Figura 3.17. Sistema de aquisição dos sinais de vibração / aceleração (mm / s^2).	63
Figura 3.18. Esquema de controle das rugosidades (R_a e R_y em μm).	64
Figura 3.19. Sistema de medição do desgaste médio de flanco (VB_B) da ferramenta de corte	65
Figura 3.20. Aparato experimental para determinação das curvas de resfriamento.	66
Figura 3.21. Corpo de prova utilizado nos ensaios de capacidade refrigerante dos fluidos de corte.	67
Figura 3.22. Corpos de prova utilizados nos ensaios de verificação de perda de energia específica média (esclerometria pendular).	69
Figura 3.23. Detalhes da geometria da ponta do penetrador (FRANCO, 1989).	70
Figura 3.24. Diagrama do esclerômetro pendular mostrando os diversos componentes do instrumento (FRANCO, 1989).	70
Figura 3.25. Ensaio de verificação de perda de energia específica média (esclerometria pendular)	71
Figura 3.26. Representação do ângulo de contato: a) maior que 90° ; b) menor que 90° ; c) espalhamento total (HADIAN e DREW, 1994).	72
Figura 4.1. Curvas de resfriamento do corpo de prova, com aplicação MQF de fluidos à base de óleos vegetais.	74
Figura 4.2. Curva de resfriamento nos primeiros 70 segundos de teste.	75
Figura 4.3. Comportamento do resfriamento na condição a seco.	76
Figura 4.4. Coeficiente de troca de calor por convecção (h) dos fluidos estudados.	78
Figura 4.5. Energia específica média consumida em amostras de aço ABNT 1045 submersas em fluidos de corte.	79
Figura 4.6. Variação do ângulo de contato dinâmico no decorrer do tempo.	81
Figura 4.7. Ângulo de contato estático 30 segundos após o contato inicial da gota na superfície.	81

Figura 4.8. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 1.	87
Figura 4.9. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 2.....	88
Figura 4.10. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 3.....	89
Figura 4.11. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 4.....	90
Figura 4.12. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 5.....	91
Figura 4.13. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 6.....	92
Figura 4.14. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 7.....	93
Figura 4.15. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 8.....	94
Figura 4.16. Gráfico Comparativo da média de $F_{x\text{máx}}$ entre o óleo vegetal comestível a base de Canola e o óleo vegetal comercial LB 2000.	97
Figura 4.17. Gráfico Comparativo da média de $F_{x\text{máx}}$ entre o óleo vegetal comestível a base de Algodão e o óleo vegetal comercial LB 2000.	98
Figura 4.18. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Rugosidades média e máxima, b) Vibração, na condição de usinagem 1.....	99
Figura 4.19. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Rugosidades média e máxima, b) Vibração, na condição de usinagem 2.....	99
Figura 4.20. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Rugosidades média e máxima, b) Vibração, na condição de usinagem 3.....	100
Figura 4.21. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Rugosidades média e máxima, b) Vibração, na condição de usinagem 4.....	100
Figura 4.22. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Rugosidades média e máxima, b) Vibração, na condição de usinagem 5.....	101
Figura 4.23. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Rugosidades média e máxima, b) Vibração, na condição de usinagem 6.....	101
Figura 4.24. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Rugosidades média e máxima, b) Vibração, na condição de usinagem 7.....	102
Figura 4.25. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Rugosidades média e máxima, b) Vibração, na condição de usinagem 8.....	102

Figura 4.26. Gráfico Comparativo da média de “Ra” entre o óleo vegetal comestível a base de Algodão e o óleo vegetal comercial LB 2000	105
Figura 4.27. Vida da ferramenta em função do volume removido de material - VRM para cada condição de corte.....	106
Figura 4.28. Desgaste médio de flanco. Seco, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.	109
Figura 4.29. Desgaste médio de flanco. Seco, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.	110
Figura 4.30. Desgaste médio de flanco. Seco, $vc = 450$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.	110
Figura 4.31. Desgaste médio de flanco. Seco, $vc = 450$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.	110
Figura 4.32. Desgaste médio de flanco. Algodão, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.....	111
Figura 4.33. Desgaste médio de flanco. Algodão, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.....	112
Figura 4.34. Desgaste médio de flanco. Algodão, $vc = 450$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.....	112
Figura 4.35. Desgaste médio de flanco. Algodão, $vc = 450$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.....	112
Figura 4.36. Desgaste médio de flanco. Canola, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.	113
Figura 4.37. Desgaste médio de flanco. Canola, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.	113
Figura 4.38. Desgaste médio de flanco. Canola, $vc = 450$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.	113
Figura 4.39. Desgaste médio de flanco. Canola, $vc = 450$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.	114
Figura 4.40. Desgaste médio de flanco. LB 2000, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.	114
Figura 4.41. Desgaste médio de flanco. LB 2000, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.	114
Figura 4.42. Desgaste médio de flanco. LB 2000, $vc = 450$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.	115
Figura 4.43. Desgaste médio de flanco. LB 2000, $vc = 450$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.	115
Figura 8.1. Comparação de desempenho entre óleos vegetais no critério força de corte.....	131
Figura 8.2. Comparação de desempenho entre óleos vegetais no critério rugosidades médias.....	132
Figura 8.3. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: $vc: 210$ m/min; $fz: 0,20$ mm/rot; $ap: 2$ mm; a seco.	133
Figura 8.4. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: $vc: 450$ m/min; $fz: 0,30$ mm/rot; $ap: 2$ mm; a seco.	134
Figura 8.5. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: $vc: 210$ m/min; $fz: 0,20$ mm/rot; $ap: 2$ mm; óleo de algodão... ..	134
Figura 8.6. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: $vc: 450$ m/min; $fz: 0,30$ mm/rot; $ap: 2$ mm; óleo de algodão.	135
Figura 8.7. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: $vc: 210$ m/min; $fz: 0,20$ mm/rot; $ap: 2$ mm; óleo de canola.	135
Figura 8.8. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: $vc: 450$ m/min; $fz: 0,30$ mm/rot; $ap: 2$ mm; óleo de canola.	136
Figura 8.9. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: $vc: 210$ m/min; $fz: 0,20$ mm/rot; $ap: 2$ mm; óleo LB 2000.	136

Figura 8.10. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: vc: 450 m/min; fz: 0,30 mm/rot; ap: 2 mm; óleo LB 2000.	137
Figura 8.11. Certificação do material aço SAE 1045 (GERDAU, 2011).	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Composição em % do aço ABNT 1045 (CHIAVERINI, 1986).	12
Tabela 2.2. Correlação entre os principais tipos de fluidos de corte e suas principais propriedades e composições (RUNGE e DUARTE, 1990; BARADIE, 1996; IGNÁCIO, 1998.Adaptada).	15
Tabela 2.3. Correlação entre as propriedades dos fluidos de corte e a ação desejada (RUNGE E DUARTE, 1990).	16
Tabela 2.4. Principais critérios que devem ser adotados em relação ao valor do pH (RUNGE e DUARTE, 1990).	24
Tabela 2.5. Aplicações potenciais de vários óleos vegetais (BONDILOLI, 2003).	30
Tabela 2.6. Características físicas e químicas dos óleos vegetais comestíveis (ANVISA, 2007).	36
Tabela 2.7. Teor de ácidos graxos em óleos vegetais (MORETTO, 1998).	39
Tabela 2.8. Propriedades dos fluidos de corte utilizados (MORETTO, 1998).	39
Tabela 3.1. Matriz de planejamento para os testes específicos de força e potência de corte, rugosidade e vibração - 1ª Etapa.	49
Tabela 3.2. Matriz de planejamento para os testes específicos de vida da ferramenta de corte - 2ª etapa.	51
Tabela 4.1. Determinação de Bi e h para cada fluido testado.	77
Tabela 4.2. Verificação da influencia das vazões na força de corte através da análise de variância (Anova, fator único).	84
Tabela 4.3. Verificação da melhor das vazões através do teste de hipótese t de student (teste t pareado, $\alpha = 0,05$).	85
Tabela 4.4. Análise estatística entre óleos vegetais no critério força de corte utilizando teste de hipótese t de student pareado ao nível de significância de 5 %, ($\alpha = 0,05$).	97
Tabela 4.5. Análise estatística entre óleos vegetais no critério rugosidade média(Ra) utilizando teste de hipótese (t de student pareado) ao nível de significância de 5 %, ($\alpha = 0,05$).	105
Tabela 4.6. Condições de usinagem para os ensaios de vida da ferramenta de corte.	107
Tabela 8.1. Matriz de planejamento geral para os testes específicos de força e potência de corte, rugosidades e vibração - 1ª etapa.	138
Tabela 8.2. Programas CNC para forças de usinagem e vida da ferramenta de corte.	140

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1. Potência de corte (kW).	62
Equação 3.2. Energia dissipada de riscamento (J / Mg).	68
Equação 4.1. Módulo adimensional de Biot.	76
Equação 4.2. Coeficiente de troca de calor por convecção ($W / m^2 \cdot K$).	77

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Letras Latinas

ae (Penetração de trabalho) [mm]

ap (Profundidade de corte) [mm]

b (Largura de corte) [mm]

D (Diâmetro da fresa) [mm]

De (Diâmetro equivalente) [mm]

E (Módulo de Elasticidade) [GPa]

f (Avanço da ferramenta de corte) [mm/rev]

Fap (Força de apoio) [N]

Fc (Força de corte) [N]

Fe (Força efetiva de corte) [N]

Ff (Força de avanço) [N]

Fp (Força passiva ou de profundidade) [N]

Ft (Força ativa) [N]

Fu (Força de usinagem) [N]

Fx (Força na direção x) [N]

Fy (Força na direção y) [N]

fz (Avanço por dente) [mm/dente]

Fz (Força na direção z) [N]

h (Espessura de corte) [mm]

HB (Dureza Brinell) [HB]

hd (Espessura do cavaco) [mm]

HV (Dureza Vickers) [HV]

IT (Qualidade de trabalho) [μm]

n (Rotação) [rpm]

P_c (Potência de corte) [kW]

R_a (Rugosidade média) [μm]

R_y (Rugosidade máxima) [μm]

VB_B (Desgaste de flanco médio) [mm]

V_c (Velocidade de corte) [m/min]

VRM (Volume removido de material) [cm^3]

Letras Gregas

γ (Ângulo de saída) [$^\circ$]

α (Ângulo de folga) [$^\circ$]

η (Ângulo de direção efetiva de corte) [$^\circ$]

λ (Ângulo de inclinação) [$^\circ$]

σ (Tensão normal) [MPa]

Φ (Ângulo de cisalhamento) [$^\circ$]

X (Ângulo de posição) [$^\circ$]

Ψ (Ângulo de direção do avanço) [$^\circ$]

ψ_0 (Ângulo de contato do dente com a peça) [$^\circ$]

Abreviações

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)

ANOVA (Análise de Variância)

ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária)

APC (Aresta postiça de corte)

CNC (Controle Numérico Computadorizado)

CNTL (Centro Nacional de Tecnologias Limpas)

DIN (Instituto Alemão de Normalização)

EP (Aditivos de Extrema Pressão)

FEMEC (Faculdade de Engenharia Mecânica)

HST (High-Speed Tools) (Ferramentas de altas velocidades)

ISI (Associação Norte Americana de Produtores de Aços)

ISO (Organização Internacional para Padronização)

LEPU (Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem)

LTM (Laboratório de Tribologia e Materiais)

MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura)

MQF (Mínima quantidade de fluido)

MQL (Mínima quantidade de lubrificação)

NBR (Normas Brasileiras)

OHSAS (Serviços de Avaliação de Saúde e Segurança Ocupacional)

PH (Potencial Hidrogeniônico)

RMS (Root Mean Square) (Valor quadrático médio)

SAE (Sociedade de Engenheiros de Mobilidade)

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos do trabalho	3
1.2. Estrutura do trabalho	4
CAPÍTULO II.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Processos de fabricação.....	6
2.2. Processos de usinagem.....	7
2.3. Processos de usinagem por fresamento	7
2.3.1. Fresamento frontal.....	9
2.4. Usinabilidade	10
2.4.1. Usinabilidade do aço abnt 1045.....	11
2.5. Fluidos de corte	13
2.5.1. Definições, tipos e propriedades dos fluidos de corte	13
2.5.2. Principais funções dos fluidos de corte	17
2.5.3. Fluidos de corte biodegradáveis	20
2.5.4. Aspectos que influenciam a estabilidade dos fluidos de corte.....	21
2.5.4.1. Aspectos tecnológicos	22
2.5.4.2. Aspectos de manuseio e perdas no processo.....	23
2.5.4.3. Aspectos da qualidade da água	23
2.5.4.4. Aspectos da degradação microbiológica.....	25
2.5.5. Aspectos e impactos ambientais na utilização dos fluidos de corte.....	26
2.5.6. Fluidos de corte de base vegetal	27
2.5.6.1. Óleos comestíveis vegetais: obtenção e composição	31
2.5.6.2. Características dos óleos comestíveis vegetais	34
2.5.6.3. Teor de ácidos graxos.....	37
2.5.7. Direções e métodos de aplicação dos fluidos de corte.....	40

2.5.8. A técnica da mínima quantidade de fluido (MQF).....	42
2.5.9. Planejamento de experimentos.....	45
CAPÍTULO III.....	47
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	47
3.1. Planejamento experimental.....	49
3.1.1. Etapa 1 – testes específicos de força, potência, vibração e acabamento da superfície.	49
3.1.2. Etapa 2 – ensaios de vida das ferramentas de corte.....	51
3.2. Caracterização do material	53
3.2.1. Corpos de prova	53
3.2.2. Metalografia dos corpos de prova	54
3.2.3. Microestruturas do material.....	55
3.2.4. Ensaio de tração	57
3.3. Equipamentos e ferramentas	58
3.3.1. Máquina - ferramenta.....	58
3.3.2. Ferramenta de corte / inserto de metal duro	59
3.3.3. Microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura	60
3.3.4. Sistema de aplicação do fluido de corte	61
3.4. Metodologias utilizadas na aquisição de dados	62
3.4.1. Sistema de medição das forças e potências de usinagem	62
3.4.2. Sistema de medição da vibração	63
3.4.3. Sistema de verificação do acabamento superficial (rugosidades)	64
3.4.4. Sistema de determinação da vida da ferramenta de corte (verificação do desgaste médio de flanco VB_B)	65
3.5. Metodologias utilizadas na determinação da capacidade lubrificante, refrigerante e de molhabilidade dos fluidos de corte.....	66
3.5.1. Metodologia para verificar a capacidade refrigerante dos fluidos de corte	66
3.5.2. Metodologia para verificar a capacidade lubrificante dos fluidos de corte	69
3.5.3. Metodologia para verificar a capacidade de aderência (molhabilidade) dos fluidos de corte	72

CAPITULO IV	75
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1. Testes específicos de determinação da capacidade lubrificante, refrigerante e de molhabilidade dos fluidos de corte (sem usinagem).....	75
4.1.1. Capacidade refrigerante dos fluidos de corte	75
4.1.2. Capacidade lubrificante dos fluidos de corte	80
4.1.3. Capacidade de aderência (molhabilidade) dos fluidos de corte.....	81
4.2. Desempenho dos fluidos de corte de base vegetal no fresamento frontal.....	83
4.2.1. Desempenho dos fluidos de corte de base vegetal em relação às forças de usinagem e potência de corte	87
4.2.2. Desempenho dos fluidos de corte de base vegetal em relação ao acabamento superficial (rugosidades) e a vibração (aceleração)	99
4.2.3. Desempenho dos fluidos de corte de base vegetal em relação à vida da ferramenta de corte	107
4.2.4. Avaliação do desgaste da ferramenta via microscopia óptica e de varredura	110
CAPITULO V	118
5. CONCLUSÕES.....	118
CAPÍTULO VI	121
6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
CAPÍTULO VII	122
7. REFERÊNCIAS	122
CAPÍTULO VIII	132
8. APÊNDICES	132
8.1. Apêndice A (gráfico do comportamento das forças máximas de corte)	132
8.2. Apêndice B (gráfico do comportamento das rugosidades médias)	133
8.3. Apêndice C (imagens complementares dos testes de vida da ferramenta de corte) ...	134
8.4. Apêndice D (certificação do material pelo fabricante)	138
8.5. Apêndice E (matriz de planejamento geral dos ensaios de forças, potência, vibração e rugosidades).....	139
8.6. Apêndice F (programas CNC para fresamento frontal)	141

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Fluidos de corte são empregados na usinagem para potencializar a produtividade e ganharam tal importância, que se tornaram, em muitos processos, essenciais para a obtenção da qualidade exigida nas peças produzidas. Entretanto, em uma análise geral das operações de usinagem, considerando os aspectos ecológicos, podem-se identificar nestas operações várias fontes agressoras do meio ambiente, entre elas, os fluidos de corte ou fluidos lubri-refrigerantes. Em distintos processos os fluidos são utilizados em grandes quantidades para aumentar a vida das ferramentas e melhorar a qualidade das peças produzidas, conseqüentemente, influenciando nos custos industriais. Os fluidos lubri-refrigerantes introduzem uma série de melhorias funcionais e econômicas no processo de usinagem de metais. As melhorias de caráter funcional são aquelas que facilitam o processo de usinagem, conferindo a este um melhor desempenho, com redução do coeficiente de atrito entre a peça/ferramenta/cavaco, expulsão do cavaco da região de corte, refrigeração da ferramenta, refrigeração da peça em usinagem, qualidade dimensional, melhor acabamento da peça usinada, refrigeração da máquina-ferramenta e impedimento da corrosão da peça usinada. Entre as melhorias de caráter econômico distinguem-se: redução do consumo de energia de corte, redução do custo da ferramenta na operação ou redução do custo de fabricação.

Para a obtenção destas melhorias, diversas formas de aplicação e tipos de fluidos de corte são utilizadas. Entre os meios auxiliares, os principais métodos utilizados são os de aplicação com fluido em abundância, ou seja, Jorro (onde os mais usados são as emulsões), a Mínima Quantidade de Fluido (MQF) ou Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) e também a usinagem com ausência de fluido, ou seja, usinagem a seco. A Figura 1.1 mostra a evolução dessas tecnologias de aplicação de fluidos em usinagem.

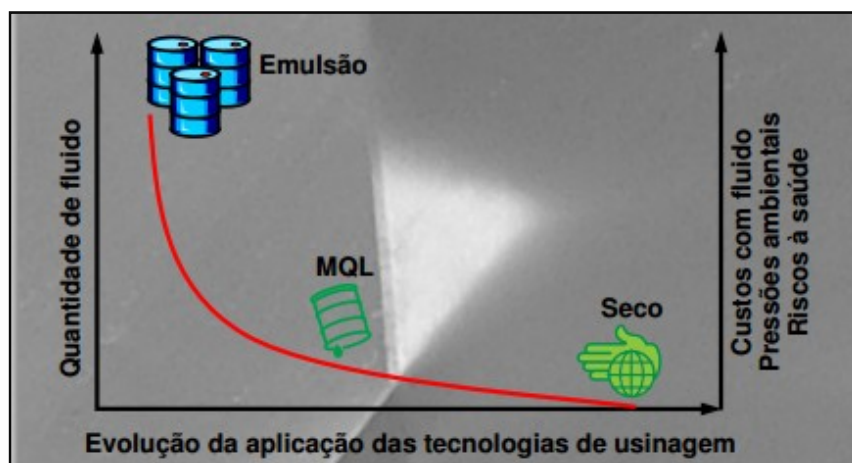


Figura 1.1. Tendência na redução do uso de fluidos de corte (CNTL, 2008).

Atingir o melhor cenário do processo destacado na Fig. 1.1, isto é, a usinagem a seco, em algumas operações ainda é utopia. Por maior que seja o avanço alcançado nos processos de usinagem e no campo dos materiais das ferramentas de corte, algumas operações ainda prescindem do uso do fluido de corte, seja visando refrigeração, lubrificação ou como veículo transportador de cavaco. Exemplos clássicos onde o fluido é imprescindível são: a usinagem com ferramentas menos resistentes (aço rápido e ligas fundidas); o corte contínuo de aços comuns e aços baixa e média liga com ferramentas de metal duro; a usinagem de peças com tolerâncias dimensionais precisas e/ou sem distorções; a furação profunda de materiais frágeis, que produzem cavacos descontínuos, (MACHADO et al, 2011).

Uma alternativa, então, é minimizar o problema, buscando o meio termo da Fig. 1.1, a utilização do MQL, de preferência com fluidos não agressivos ao meio ambiente. A utilização desta técnica tem-se revelado uma alternativa muito vantajosa, principalmente no processo de fresamento, relativamente à aplicação abundante de fluido na usinagem, pois consiste na pulverização de apenas uma pequena quantidade de óleo lubrificante na região de corte.

Para Tan et al (2002), depois que foram publicadas as normas ISO 9000 para os sistemas de gerenciamento da qualidade, ISO 14000 para o sistema de gerenciamento ambiental e as OHSAS 18001 para Saúde e Segurança Ocupacional, aplicar nas empresas as três séries em um único sistema de gerenciamento integrado transformou-se em uma das grandes mudanças estratégicas, não somente sob a perspectiva da engenharia, mas também sob a perspectiva de marketing e negócios.

Assim, em um cenário de preocupação mundial com o meio ambiente, a indústria mecânica necessita adequar seus processos visando à minimização de seus rejeitos, dentre eles os resíduos gerados ao final da vida útil dos fluidos de corte.

A motivação para este trabalho partiu da idéia de introduzir fluidos considerados ambientalmente corretos nos processos de usinagem pelas técnicas MQL, visto que a grande utilização de óleos minerais vem criando muitos efeitos negativos sobre o meio ambiente. O principal efeito negativo está particularmente ligado ao seu uso inadequado, que resulta na contaminação das águas superficiais e subterrâneas, poluição do ar e contaminação do solo, além dos efeitos nocivos à saúde humana. Em geral, os óleos de base vegetal são substitutos muito atrativos para os óleos derivados do petróleo porque são menos nocivos ao meio ambiente, renováveis, menos tóxicos e biodegradáveis. Já existem no mercado vários fluidos industriais de base vegetal, que tem mostrado grandes potenciais para diversas aplicações. Nesta direção, surgiu a idéia de testar óleos vegetais refinados comestíveis que atendem perfeitamente os requisitos ecológicos e relativos à saúde humana, pois são ambientalmente corretos, mas precisam mostrar desempenho técnico satisfatório, para poderem vir a ser utilizados como fluidos de corte em processos de fabricação por usinagem. Este trabalho propõe verificar esta viabilidade baseada no desempenho técnico desses fluidos.

1.1. Objetivos do trabalho

Este trabalho tem por objetivo geral investigar a influência de óleos refinados vegetais comestíveis (algodão, babaçú, canola, girassol, milho e soja), utilizados como fluidos de corte, aplicados pela técnica de Mínima Quantidade de Fluidos (MQF) na usinabilidade do aço ABNT 1045, através do processo de fresamento frontal. Nos testes experimentais será usado também um fluido industrial comercial, não comestível, que também possui base vegetal (LB 2000, fabricado pela ITW Chemical Products Ltda.), para comparações. Especificamente, pretende-se:

- Desenvolver um planejamento fatorial de experimentos envolvendo as variáveis e os níveis de forma aleatória;
- Determinar experimentalmente os parâmetros de usinabilidade (força e potência de usinagem, vibração e acabamento da superfície) dos fluidos de corte através de ensaios de curta duração, realizando as operações de usinagem de acordo com o planejamento fatorial;
- Comparar os resultados do desempenho dos fluidos aplicados com MQF, com a aplicação da emulsão na forma de jorro e também com a usinagem a seco;
- Determinar a vida das ferramentas de corte quando utilizados os dois óleos refinados vegetais comestíveis que apresentarem os melhores desempenhos nos ensaios de

usinabilidade anteriores, comparando com o fluido vegetal industrial comercial e também com a condição a seco;

- Analisar a evolução do desgaste das ferramentas de corte e verificar a tendência de seu crescimento em função da quantidade removida de material e do comprimento linear fresado.
- Identificar a influência dos óleos refinados vegetais aplicados como fluidos de corte no resultado final, para diferentes condições de corte, empregando técnicas de análise de variância (ANOVA).

1.2. Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho está dividida em oito capítulos, brevemente descritos a seguir:

Capítulo 1 – Trata-se do atual capítulo, Introdução, que contextualiza o trabalho apresentando a importância e a preocupação mundial no uso de fluidos de usinagem na indústria mecânica, a busca por fluidos considerados ambientalmente corretos, a motivação e os objetivos propostos para realizar o trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica – Neste capítulo é apresentado às principais tecnologias e ciências envolvidas nesse trabalho, suas especificações e características.

Capítulo 3 – Procedimento Experimental – Descreve-se cada etapa do experimento em sua respectiva ordem de execução. São apresentados os critérios a serem utilizados no planejamento e os fatores a serem considerados na análise do comportamento dos fluidos, bem como os recursos empregados no trabalho.

Capítulo 4 – Resultados e Discussão – Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos do procedimento experimental para cada fator avaliado, as correlações entre os fatores e discussões sobre o tema.

Capítulo 5 – Conclusão - Neste capítulo é apresentado às principais conclusões obtidas no trabalho frente aos objetivos propostos.

Capítulo 6 - Sugestões para Trabalhos Futuros - Com base na experiência vivida na execução deste trabalho são enumeradas algumas sugestões de temas que podem ser investigados futuramente, para dar continuidade a esta pesquisa, ou gerar inovações.

Capítulo 7 - Referências – Contém todas as pesquisas nas mais diversas literaturas que serviram como referencial teórico na elaboração deste trabalho.

Capítulo 8 - Apêndices – Contém textos e gráficos elaborados pelo autor como complementação de seus argumentos e informações adicionais para documentação e esclarecimentos.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Processos de fabricação

Os processos de fabricação mecânica têm como objetivo a modificação de um corpo metálico ou não metálico, com o fim de lhe conferir uma forma definida (dimensão e acabamento). Os processos de fabricação podem ser divididos em dois grupos: processos mecânicos, nos quais as modificações de forma são provocadas pelas aplicações de tensões externas e processos metalúrgicos, nos quais as modificações de forma estão relacionadas com altas temperaturas (SCHEY, 1987). A Figura 2.1 esquematiza essa divisão dos processos de fabricação.

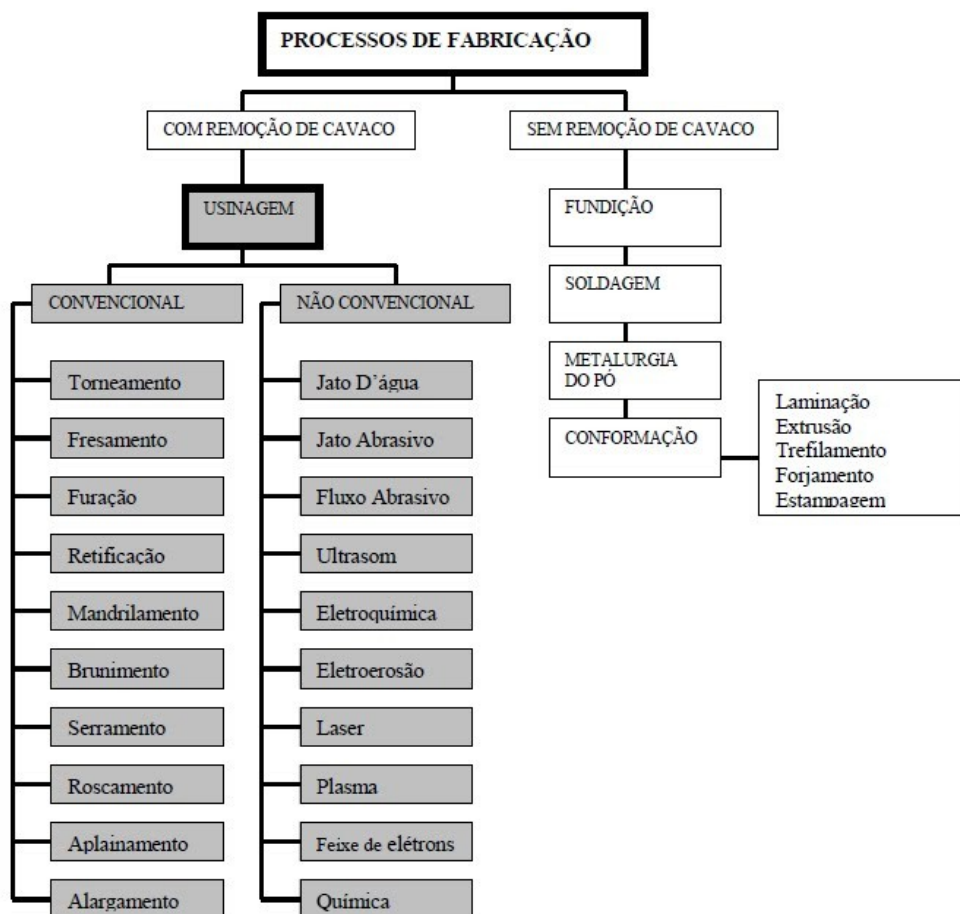


Figura 2.11. Representação esquemática dos processos de fabricação (SCHEY, 1987).

2.2. Processos de usinagem

Conforme Agostinho et al (2004), as peças metálicas fabricadas pelos processos de fabricação primários como fundição, forjamento laminação, entre outros, geralmente apresentam superfícies mais ou menos grosseiras e que, portanto, exigem um determinado acabamento, por outro lado os processos citados nem sempre permitem obter certas peculiaridades, como de determinados tipos de saliências ou reentrâncias, furos rosqueados, furos passantes, etc. Finalmente, para alguns tipos de peças, os processos de fabricação primários convencionais não apresentam as melhores condições de custo e produtividade. O processo de usinagem possibilita atingirem-se estes e outros objetivos, os quais, em consequência, podem ser assim resumidos:

- Acabamento de superfícies de peças fundidas ou conformadas plasticamente, de modo a obter-se melhor aspecto superficial e melhores tolerâncias dimensionais, de acordo com as especificações de fabricação e de acordo com o emprego.
- Obtenção de peculiaridades, impossíveis de conseguir por outros processos.
- Fabricação seriada de peças a um custo mais baixo.
- Fabricação de uma ou poucas peças, praticamente com qualquer forma, a partir de um bloco de material metálico.

De acordo com Groover (2002), citado por Guenza (2008), a usinagem possui papel fundamental nos processos de fabricação dos mais variados ramos da indústria mecânica. Dentre os diversos processos de usinagem, o fresamento constitui um dos mais importantes pela sua produtividade e flexibilidade.

2.3. Processos de usinagem por fresamento

Segundo Ferraresi (1977), a operação de fresamento é a operação de usinagem que se caracteriza por:

- A ferramenta multicortante, chamada fresa, é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente ao redor de um eixo; de um movimento de rotação ao redor de seu eixo permitindo assim que cada uma das arestas cortantes (ditos dentes da fresa) retire a parte do material que lhe compete fazê-lo;

- O movimento de avanço, que permite o prosseguimento da operação, é geralmente feito pela própria peça em usinagem que está fixada na mesa da máquina (raramente o movimento de avanço é feito pela própria ferramenta);
- O movimento de avanço obriga a peça a passar sob a ferramenta que lhe dá a forma e a dimensão desejadas;
- É uma operação que consegue uma tolerância da ordem de IT6 a IT11 e um acabamento superficial na faixa de $Ra = 0,1$ a $3,2 \mu m$.

O fresamento destaca-se por apresentar grande versatilidade em relação à capacidade de gerar geometrias, bem como custos relativamente reduzidos (DINIZ et al, 2006).

Metal's Handbook (1989) classifica os principais métodos de fresamento da seguinte maneira: fresamento tangencial (peripheral milling), fresamento frontal (face milling) e fresamento de topo ou misto (end milling), que pode ser considerado uma combinação dos dois métodos anteriores. Cada método de fresamento é determinado em função do tipo de fresa utilizada e da disposição do eixo de rotação da ferramenta em relação à superfície que esta sendo fresada. A Figura 2.2 mostra os tipos de fresa mais utilizados, cujos termos servem para designar o método de fresamento ao qual são aplicadas que são: a) fresamento tangencial, b) fresamento frontal, c) fresamento misto ou de topo.

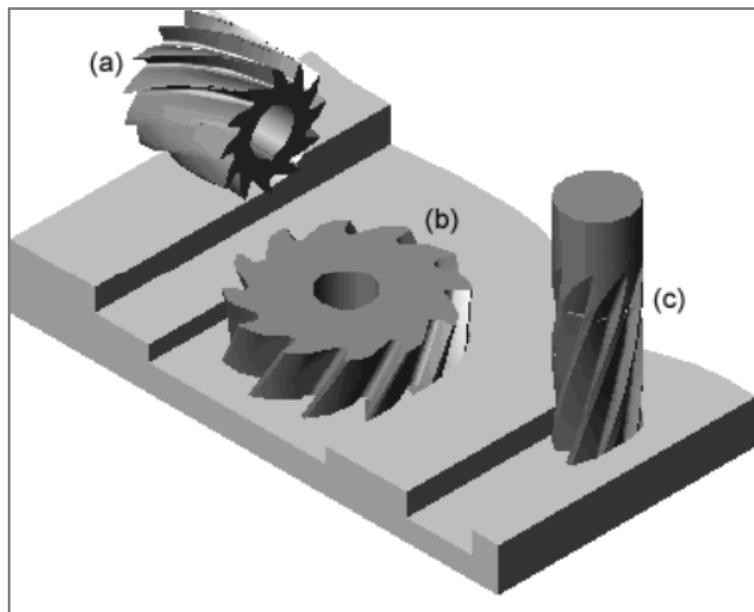


Figura 2.2. Tipos de fresas e métodos de fresamentos mais comuns (METAL'S HANDBOOK, 1989).

2.3.1. Fresamento frontal

O fresamento frontal é um processo de fabricação em que a geração das superfícies usinadas é proporcionada pelo gume principal e pelo gume secundário no topo da ferramenta. O conhecimento das forças originadas neste processo é de grande relevância no que concerne à determinação dos parâmetros de corte, ao esclarecimento dos mecanismos de desgaste e à previsão da amplitude de vibrações, que são fatores decisivos na eficiência da usinagem de componentes (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

Amorim (2003) comenta que o fresamento frontal pode ser assimétrico, quando o corte não se dá sobre o eixo de simetria da peça e simétrico quando o deslocamento do eixo da fresa se dá sobre o eixo de simetria da peça, comenta ainda que o corte assimétrico permite melhores condições de trabalho, reduzindo dentre outros, as vibrações, os esforços por dente e o impacto na entrada da aresta na peça.

Para minimizar o efeito do choque mecânico da aresta de corte com a peça Diniz et al (2006), cita Filho (1998), recomendando utilizar um valor de J pequeno, Fig. 2.3, pois a espessura do cavaco ($h_d = f_z$) na entrada do dente da ferramenta diminui, resultando em menor impacto na entrada da ferramenta.

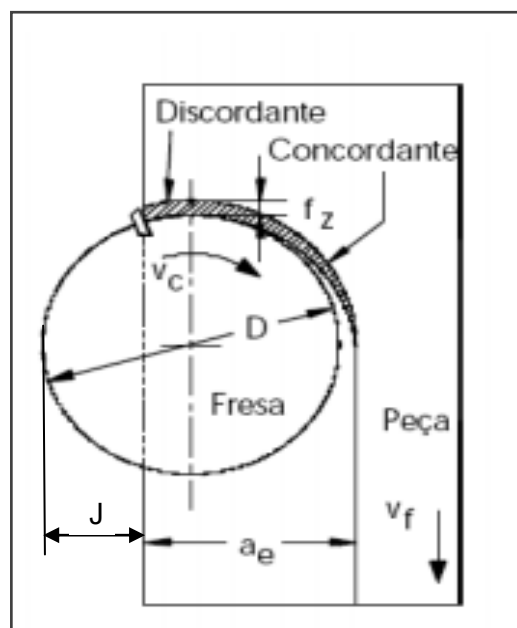


Figura 2.3. Fresamento frontal assimétrico (DINIZ et al, 2006).

Drozda et al (1983), citado por Polli (2005), comenta que no fresamento frontal a superfície usinada resulta da ação combinada dos gumes localizados na periferia e na face frontal da fresa, esta geralmente em ângulo reto ao eixo da ferramenta. Normalmente a superfície fresada é plana, e não corresponde ao contorno dos gumes. A Figura 2.4 evidencia este processo.

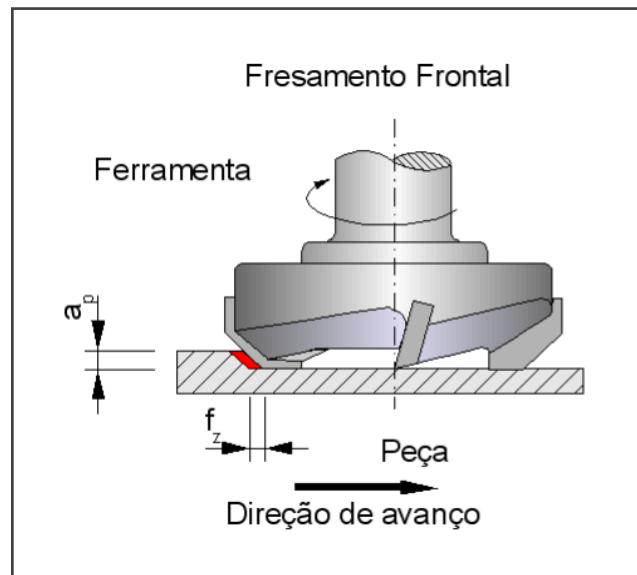


Figura 2.4. Usinagem por fresamento frontal (POLLI, 2005).

2.4. Usinabilidade

É o termo mais frequentemente usado para denotar o desempenho de usinagem de um material; pode ser definido pela capacidade de um material ser cortado ou usinado por uma ferramenta apropriada. A avaliação quantitativa deste parâmetro, no entanto, é um problema de dificuldade considerável, por causa da variedade de conotações associadas com o termo. Não é possível descrever usinabilidade em função de unidades fundamentais, e como resultado, a expressão mais prática usada para avaliar a usinabilidade de um material é relativa, isto quer dizer, comparativa, diversos métodos têm sido usados para avaliar a usinabilidade de vários materiais. Muitos desses métodos são baseados em resultados de testes de vida da ferramenta, velocidade de corte, ou em medições de forças da ferramenta ou quantidades relacionadas a tais testes (PIMENTEL et al, 2004; MACHADO et al, 2009 e TRENT, 1984).

A usinabilidade não é uma propriedade intrínseca do material, mas um resultado da interação do metal com a operação de usinagem. As condições de usinagem são estabelecidas para cada tipo de material e ferramenta. O avanço e a velocidade de corte são limitados pelo calor gerado pelo atrito e pela deformação plástica do cavaco. Quanto maior a usinabilidade do material da peça e a resistência ao desgaste do material da ferramenta, maiores podem ser os avanços e as velocidades de corte. Devem-se levar em consideração os fluidos de corte que têm ação lubrificante e refrigerante. A profundidade de corte é um fator que limita o avanço e a velocidade de corte. Em operações de acabamento, ao invés das operações de desbaste, utilizam-se avanços menores e velocidades maiores para atender as especificações de rugosidade superficial e a precisão das dimensões. Em qualquer trabalho de usinagem, a produção depende dos avanços e velocidades de corte; entretanto, as condições mais econômicas de usinagem dependem também de outros fatores como tempo e custos de preparação e colocação das ferramentas nas máquinas, (TESSLER e BARBOSA, 1993).

Conforme Gonzales e Cupini (1992) entendem-se como propriedades de usinagem de um metal aquelas que expressam o seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem. Para avaliação da usinabilidade, são geralmente usados quatro critérios, utilizados isoladamente ou em conjunto:

- Vida da ferramenta;
- Força de usinagem;
- Qualidade superficial da peça;
- Formação de cavacos (forma e tamanho dos cavacos).

Os fatores que influem na determinação da usinabilidade são: O material da peça (composição química, microestrutura, dureza, propriedades mecânicas, rigidez da peça), e os processos mecânicos e condições de usinagem (material e geometria da ferramenta, condições de trabalho, fluido de corte, rigidez da máquina e do sistema de fixação, tipo de operação a ser realizada).

2.4.1. Usinabilidade do aço ABNT 1045

Em diversas aplicações os materiais fornecidos por processos de produção convencionais possuem características inadequadas que podem influenciar negativamente o seu desempenho e até mesmo comprometê-lo; empenamentos, tensões internas e

estruturas indesejadas surgem com frequência e afetam as propriedades do material (INTERLOY, 2009). O aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação. Os aços são os materiais metálicos mais empregados na indústria mundial. Com 0,45% de carbono em sua composição, conforme Tab.2.1 o aço ABNT 1045 é classificado como aço de médio teor de carbono com boas propriedades mecânicas e tenacidade e considerado de boas usinabilidade e soldabilidade; quando laminado a quente ou normalizado. As suas aplicações compreendem eixos, peças forjadas, engrenagens comuns, componentes estruturais de máquinas, virabrequim, etc. (CHIAVERINI, 1986). Estes aços não apresentam as mesmas características mecânicas e metalúrgicas apresentadas pelos aços especiais, pois em seus processos de fabricação não são controlados o tamanho de grão austenítico, os níveis de gases dissolvidos, o grau de pureza, etc. As faixas de composições químicas dos aços comerciais são apenas orientadas pela norma NBR 6006 ou pelas normas internacionais tipo SAE, AISI ou DIN, portanto, não há garantias de que os teores dos elementos químicos principais ou residuais estejam estritamente dentro dos limites especificados por estas normas, além disto, nos aços comerciais, não são garantidas as faixas de temperabilidade conforme as normas NBR ou SAE (SMITH, 1998). A Figura 2.5 representa uma peça fabricada pelo referido material.

Tabela 2.1. Composição química em % do aço ABNT 1045 (Chiaverini, 1986).

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Al	Ti
0,45	0,66	0,012	0,008	0,2	0,01	0,02	0,01	0,002



Figura 2.5. Eixo motriz fabricado com aço ABNT 1045 (rolemar.com).

2.5. Fluidos de corte

Para Alves (2006), diversos problemas são identificados no uso dos fluidos de corte, tais como, os perigos à saúde e ao meio ambiente e cita que os mais recentes esforços da indústria metal-mecânica têm se focado no desenvolvimento de bons processos de reciclagem e na substituição de produtos químicos utilizados nos processos de fabricação, tornando-os processos limpos. Diversos aspectos dos problemas ambientais associados aos fluidos de corte podem ser evitados ou minimizados, por meio de investimentos em pesquisas para desenvolvimento de novos tipos de fluidos, de métodos de aplicação menos agressivos e de treinamentos voltados para a formação de uma nova cultura na indústria metal-mecânica. Uma nova cultura que possibilite o perfeito entendimento dos impactos ambientais causados pelo uso indisciplinado dos fluidos de corte e a consequente conscientização dos empresários e trabalhadores em relação à tomada de atitudes voltadas às boas práticas ambientais.

Os fluidos de corte são composições complexas contendo agentes químicos que variam de acordo com o tipo de operação a ser executada e os metais a serem trabalhados podendo ser perigosos para a saúde do trabalhador e ao meio ambiente (SILVA et al, 2005).

De acordo com Motta e Machado (1995), cada tipo de fluido de corte apresenta características particulares, assim como, vantagens e limitações diversas; entretanto, as características que distinguem as diferentes classes nem sempre são facilmente percebidas, o que dificulta a classificação.

2.5.1. Definições tipos e propriedades dos fluidos de corte

Nas operações de trabalho em materiais há duas variáveis que se relacionam aos fluidos de corte: a uniformidade do corte e o prolongamento da vida útil da ferramenta, além do objetivo básico que é a rapidez da operação.

O trabalho em materiais se baseia, a princípio, em uma operação de cisalhamento do material pela pressão exercida, com a ferramenta de corte, sobre uma camada superficial da peça. Essa operação desenvolve, na região do corte, grandes quantidades de calor em virtude das elevadas pressões necessárias ao cisalhamento. O aquecimento excessivo deforma a peça e produz imperfeições no trabalho, em consequência do arrancamento de

partículas metálicas das camadas abaixo do corte. Posteriormente, pelo calor, estas se soldam a parte cortada. Além disso, o superaquecimento reduz a vida útil da ferramenta.

Fluidos de corte são aqueles líquidos e gases aplicados na ferramenta e no material que está sendo usinado, a fim de facilitar a operação de corte. Frequentemente são chamados de lubrificantes ou refrigerantes em virtude das suas principais funções na usinagem.

Segundo Silliman (1992), é usual encontrar diferentes nomes para um mesmo tipo de fluido de corte, o que, apesar de não ser incorreto, causa expressiva confusão e, portanto, requerem uma nomenclatura para facilitar a compreensão das diferentes características de cada tipo.

Fluido de corte: é qualquer fluido utilizado para o corte ou usinagem de metais ou outros materiais (RUNGE e DUARTE, 1990).

Óleo de corte: é um fluido de corte cuja origem pode ser mineral (petróleo), animal ou vegetal, puro ou em combinações Silliman (1992), usado conforme fornecido, isto é, não é misturado à água, sendo também chamado de puro ou integral (RUNGE e DUARTE, 1990; BARADIE, 1996).

Óleo emulsificável: é o fluido de corte à base de óleo mineral misturado com agentes emulsificadores (SILLIMAN, 1992), utilizado misturado à água em forma de emulsão, seja qual for o teor do óleo empregado (RUNGE e DUARTE, 1990). É comumente chamado de óleo solúvel em água ou fluido de corte emulsificável (BARADIE, 1996 e SILLIMAN, 1992).

Fluido sintético: também chamado de fluido químico, é o fluido de corte que consiste de solução química composta de materiais inorgânicos e/ou outros materiais dissolvidos na água e que não contém óleo mineral (BARADIE, 1996).

Fluido semi-sintético: também chamado de fluido semi-químico, é o fluido de corte que contém pequena quantidade de óleo mineral e é usado misturado em água, na qual forma emulsão fina, parecida com as soluções (RUNGE e DUARTE, 1990). Essencialmente é uma combinação do fluido sintético com uma quantidade muito pequena de óleo emulsificável que contém alto teor de emulsificante (BARADIE, 1996 e SILLIMAN, 1992).

Atualmente há uma grande variedade de tipos e fabricantes de fluidos de corte disponíveis e também de alternativas de métodos de aplicação, o que requer uma seleção adequada e racional, que nem sempre é uma tarefa fácil. A seleção e o correto uso do fluido de corte influem diretamente sobre a qualidade de acabamento das peças, a produtividade, o custo operacional, a saúde do trabalhador e o meio ambiente (RUNGE e DUARTE, 1990).

A Tabela 2.2 apresenta os principais fluidos de corte disponíveis no mercado e a Tab. 2.3 especifica as propriedades dos mesmos.

Tabela 2.2. Correlação entre os principais tipos de fluidos de corte e suas principais propriedades e composições (RUNGE e DUARTE, 1990, BARADIE, 1996, IGNÁCIO, 1998, adaptada).

Fluidos de Corte					
Classificação	Integrais	Solúveis em Água			Gases
		<i>Emulsões</i>	Semi-Sintéticos	Sintéticos	
Principais Composições	Óleo mineral	Água	Água	Água	Ar
	Óleos graxos	Óleo mineral	Óleo mineral	Sais orgânicos	Argônio
	Cloro	Emulsificadores	Elementos orgânicos e inorgânicos	Cloro	Hélio
	Enxofre	Cloro	Cloro	Enxofre	Nitrogênio
	Fósforo	Enxofre	Enxofre	Biocidas	Gás carbônico
		Glicol	Biocidas	Agentes umectantes	
		Biocidas			
Principais Propriedades	Lubrificação	Refrigeração	Refrigeração	Refrigeração	Antioxidação
	Extrema-pressão	Extrema-pressão	Extrema-pressão	Extrema-pressão	Usinagem a seco
	Anticorrosão	Antioxidação	Antioxidação	Antioxidação	
		Anticorrosão	Anticorrosão	Anticorrosão	
		Lubrificação	Lubrificação		
		Lavagem			

Tabela 2.3. Correlação entre as propriedades dos fluidos de corte e a ação desejada (RUNGE e DUARTE, 1990)

PROPRIEDADES DOS FLUIDOS DE CORTE	AÇÃO ESPERADA
Anticorrosiva	Proteger a peça, a ferramenta e os componentes da máquina contra corrosão.
Antioxidantes	Evitar a oxidação prematura do fluido devido à ação das elevadas temperaturas.
Antidesgaste	Reforçar as propriedades lubrificantes do óleo mineral.
Antiespumante	Evitar a formação de espuma, impedindo a formação de bolha de ar na área de corte.
Extrema- pressão	Resistir às elevadas pressões de corte.
Umectação	Molhar a superfície de corte, melhorando a refrigeração.
Ausência de odores	Evitar odores fortes ou desagradáveis no meio ambiente
Ausência de precipitados	Garantir a livre circulação do fluido pelo sistema.
Viscosidade, Calor específico, Condutibilidade térmica, Vapor latente de vaporização	Remover o calor gerado durante a operação de corte, prolongar a vida útil das ferramentas.
Lavabilidade	Remover cavacos e poeiras produzidos durante a operação de corte.
Compatibilidade com o meio	Compatibilidade com a saúde humana, com o material que está sendo usinado e com o meio ambiente.

De acordo com Baradie (1996), os principais grupos que abrangem as classificações dos fluidos de corte são:

1. Óleo mineral puro
2. Óleo graxo
3. Misturas de óleo mineral e óleo graxo
4. Aditivos de Extrema Pressão (EP)
5. Misturas de óleo mineral e óleo graxo sulfurizado
6. Misturas de óleo mineral e óleo graxo sulfurizado e enxofre ativo
7. Misturas de óleo mineral e óleo mineral sulfurizado
8. Misturas de óleo mineral, óleo mineral sulfurizado e óleo graxo sulfurizado.
9. Misturas de óleo mineral e parafinas cloradas
10. Misturas de óleo mineral com parafinas cloradas e óleo graxo sulfurizado
11. Misturas de óleo mineral e óleo graxo clorado
12. Misturas de óleo mineral, óleo graxo clorado e óleo graxo sulfurizado.
13. Misturas de óleo mineral e óleo graxo sulfoclorado

2.5.2. Principais funções dos fluidos de corte

As duas principais funções dos fluidos de corte são: a lubrificação nas velocidades de corte relativamente baixas e a refrigeração nas velocidades de corte relativamente altas (SHAW, 1984).

De acordo com Sokovic e Mijanovic (2001), os fluidos de corte foram introduzidos nos processos de corte com o propósito de melhorar as características dos processos tribológicos, os quais estão sempre presentes nas superfícies de contato entre a ferramenta e a peça em usinagem.

Conforme Pawlak et al (2004), os fluidos têm duas importantes funções relacionadas aos severos fenômenos tribológicos que ocorrem onde há processos físicos envolvidos, que

são promover a lubrificação entre a peça trabalhada e a ferramenta e também remover o calor gerado durante os processos de corte.

Para Attanasio (2005), os fluidos de corte exercem um importante papel nas operações de corte, uma vez que devem, essencialmente, garantir a lubrificação e refrigeração e, secundariamente, proteger a peça em fabricação e a ferramenta contra a corrosão, além de promover a remoção dos cavacos. Acrescenta ainda que não seja fácil alcançar a superfície de corte em decorrência da alta pressão existente na área de contato e ao pequeno espaço entre o cavaco e a ferramenta que dificultam o acesso do fluido refrigerante na zona de corte.

Segundo Stanford, Lister e Kibble (2007), tradicionalmente, os fluidos de corte têm sido vistos mais propriamente como uma solução do que como um problema, uma vez que eles têm provado ser um significativo benefício para o processo de corte de metal e exercerem um importante papel na melhoria e manutenção do acabamento final da peça, na remoção dos cavacos, na redução das forças de corte, na supressão das limalhas e na resistência à corrosão da peça e da máquina ferramenta.

De acordo com Trent e Wright (2000), o fluido de corte não deve apenas melhorar o processo de corte conforme especificado, mas deve, também, satisfazer uma série de outros requerimentos, tais como: não ser tóxico e não oferecer risco ao operador, não ser inflamável, não ser prejudicial para o sistema de lubrificação da máquina-ferramenta, não provocar corrosão ou manchar a peça usinada, além disso, deve oferecer proteção à superfície usinada e evidentemente, ter o menor custo possível.

Assim, as funções dos fluidos de corte podem ser resumidas, conforme Runge e Duarte (1990), em:

- Refrigerar;
- Lubrificar;
- Melhorar o acabamento da peça;
- Reduzir o desgaste das ferramentas;
- Remover os cavacos da área de corte;
- Proteger contra a corrosão (a máquina, a ferramenta, a peça e os cavacos);
- Prevenção contra soldagem cavaco-ferramenta;
- Redução da dilatação térmica da peça;
- Evitar danos à estrutura superficial e crescimento exagerado de tensões residuais na superfície usinada.

Segundo Baradie (1996), a introdução de constituintes com propriedades lubrificantes e de certos aditivos como: Anti-espumantes, anticorrosivos, antioxidantes, biocidas, antidesgaste e extrema pressão (EP). Além de boa umectação, capacidade de absorção de calor, transparência, inodor, não formar névoa, não provocar irritações na pele, compatibilidade com o meio ambiente, baixa variação da viscosidade quando em trabalho (índice de viscosidade compatível com a sua aplicação). Permite ao fluido de corte fluir na área de contato e possibilitar o melhor deslizamento da ferramenta e dos cavacos e a redução da tensão de cisalhamento.

Conforme Trent (1991), o acabamento superficial dos componentes usinados está relacionado com a força de usinagem que depende dentre outros fatores, da qualidade da lubrificação usada. Pequenas partículas da aresta postiça de corte é outro fator que deteriora imensamente o acabamento superficial da peça usinada. O uso de fluidos lubrificantes torna-se benéfico a baixas velocidades de corte, com a predominância da lubrificação há redução do atrito, reduzindo a região de aderência, e consequentemente prevalecendo a de escorregamento, tendendo a eliminar a APC, resultando em melhoria do acabamento superficial.

Em elevadas velocidades de corte, o fluido atua mais como refrigerante, abaixando a temperatura média nas zonas de cisalhamento, principalmente na primária, já que praticamente não tem acesso à secundária. Com isto o efeito de amolecimento do material, devido ao aumento da temperatura fica reduzido, o que faz com que as forças de corte se elevem, e que poderá promover piora na rugosidade da superfície da peça.

O calor é naturalmente gerado em decorrência do processo de corte dos materiais. O aumento da temperatura na peça promove a sua dilatação. Em materiais com grandes coeficientes de expansão térmica, os problemas de controle dimensional são maiores. Em operações onde a alimentação e a retirada da peça são feitas de forma manual, deve haver a precaução quanto a queimaduras do operador. O uso do refrigerante controla a elevação excessiva da temperatura reduzindo os efeitos de superaquecimento da peça fabricada.

É sabido que a eficiência do fluido em reduzir a temperatura da ferramenta diminui com aumento da velocidade de corte e da profundidade de corte. Smart e Trent (1974), por meio do método metalográfico aplicado a ferramentas de aço rápido, usinando níquel e aço com fluido emulsionável 3%, obtiveram as isotermas e como resultados encontraram que a atuação do fluido como refrigerante reduz levemente a máxima temperatura na interface, mas faz que haja um grande aumento no gradiente de temperatura entre as regiões interna da ferramenta e imediatamente vizinha do lado de fora, que sofreu resfriamento.

2.5.3. Fluidos de corte biodegradáveis

Oliveira e Alves (2007), concluíram que a utilização de fluidos de corte no processo de usinagem faz da indústria metal-mecânica uma potencial agressora do meio ambiente.

Entre as alternativas pesquisadas estão os óleos vegetais, substitutos atrativos pela baixa toxicidade, boa biodegradabilidade e sustentabilidade ambiental (SHASHIDHARA e JAYARAM, 2010).

Entre estes produtos que podem ser testados em formulações de fluidos de corte estão o éster metílico epoxidado e o biodiesel, que podem ser obtidos de diferentes óleos vegetais, os quais são de fonte renovável e contribuem para a captura de carbono da atmosfera. Óleos vegetais possuem excelente lubricidade, biodegradabilidade, baixa volatilidade e boas características de viscosidade e temperatura (EHRAN, 2006) e, submetidos a modificações químicas em sua estrutura, passam a ser uma alternativa mais atrativa para o seu uso (HWANG e ERHAN, 2006; CAMPANELLA, 2010).

A substituição de matérias primas de origem fósseis por matérias primas renováveis deve também ser acompanhada dos seus estudos de impacto ambiental, uma vez que além de ser renovável o processo de transformação do óleo em éster epoxidado deve também primar pelo baixo impacto ambiental.

Theodori et al (2004) apresentam o conceito de lubrificantes adaptados ao meio ambiente (EAL – environmentally adapted lubricants) como sendo de alta biodegradabilidade e baixa toxicidade, mantendo desempenho semelhante às alternativas convencionais. Petterson (2007) inclui, ainda, um baixo custo do ciclo de vida do óleo. Clarens et al (2008), afirma que este conceito é, essencialmente, sinônimo da utilização de óleos vegetais em formulações de lubrificantes.

Na última década, a indústria vem tentando formular lubrificantes biodegradáveis com características superiores aos usuais, baseados em óleo mineral. Dessa forma, além da catálise natural, os óleos vegetais são promissores candidatos como fluido de base em lubrificantes, a fim de atingir a sustentabilidade ambiental.

De acordo com Coelho (2006), compostos tóxicos em uma mistura modificam seletivamente a composição da comunidade biológica que a degradaria, alterando a sua atividade, sendo que, a adição de agentes biocidas em misturas de compostos químicos, para protegê-los da biodegradação e aumentar a vida útil dos produtos, tais como os fluidos de corte, torna-os mais persistentes quando liberados para o ambiente.

Segundo Eisentraeger et al (2002), a biodegradabilidade é um dos mais importantes aspectos no que diz respeito ao descarte das substâncias no meio ambiente, sendo que, os fluidos de corte à base de ésteres sintéticos ou naturais são facilmente biodegradáveis em contraste com os óleos minerais.

Também para Suda et al (2002), a mais importante medida de compatibilidade ambiental dos lubrificantes é a sua biodegradabilidade, sendo que, em contraste com os óleos de base mineral, os óleos vegetais apresentam alta biodegradabilidade, assim como, os ésteres sintéticos fornecem uma ampla faixa de biodegradabilidade, dependendo da combinação das estruturas moleculares de ácidos e alcoóis.

Na busca por fluidos de corte com características de biodegradabilidade, isenção de toxicidade e segurança fisiológica, Oliveira e Alves (2006) formularam um fluido de corte à base de óleo de mamona sulfonado, desenvolvido para o processo de retificação a altas velocidades com rebolo de CBN vitrificado, cujos resultados apresentaram, na concentração de 21%, um desempenho superior aos outros fluidos comerciais à base de água e semelhante ao do óleo mineral com relação ao desgaste do rebolo e qualidade superficial da peça, sendo que, depois de analisado quimicamente, foi considerado facilmente biodegradável.

No desenvolvimento desse novo fluido de corte, Oliveira e Alves (2006) propuseram uma fórmula, a partir de óleo vegetal e contendo poucos tipos de aditivos, cuja composição incluiu bactericida derivado de triasina, agente emulsificante poliglicol de éster sintético, uma composição de ésteres sintéticos como inibidor de corrosão, óleo de mamona sulfonado (80%) e água, sendo que, para testar a biodegradabilidade do novo produto utilizaram o método Ready Biodegradability: 301B CO₂ Evolution Test; os resultados da análise de biodegradabilidade lhes permitiram concluir que o novo fluido de corte é biodegradável e, do ponto de vista ecológico, não é agressivo ao meio ambiente e seu tratamento e descarte podem ser feitos com maior facilidade.

2.5.4. Aspectos que influenciam a estabilidade dos fluidos de corte

A partir do processo de preparação para aplicação, um grande número de inconvenientes atinge os fluidos de corte de várias formas e fontes, podendo determinar o tempo de vida útil deste produto e também aumentar as responsabilidades da empresa. Além das causas existentes na preparação, a utilização dos fluidos de corte em processos de usinagem torna-o susceptível ao ataque de microorganismos, bactérias, fungos e do

próprio operador quando da sua higiene. Considerando-se também os fatores naturais, as maiores causas e os respectivos agravantes que resultam em problemas internos com fluidos de corte são apresentados na Fig.2.6; entre os problemas encontrados, citamos os métodos e as tecnologias de utilização, os custos operacionais, as enfermidades laborais e a má qualidade do produto final (IGNÁCIO, 1998).

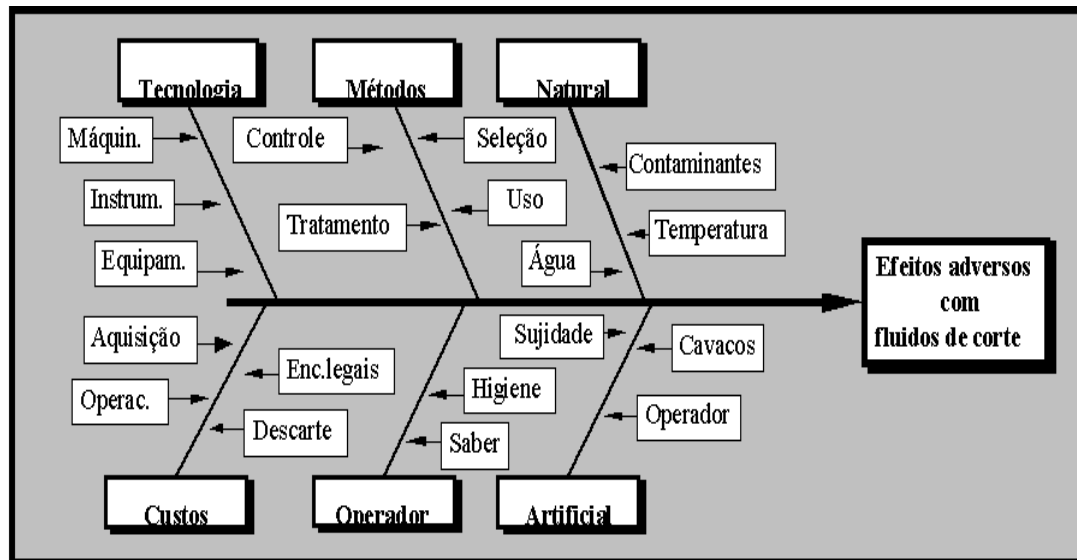


Figura 2.6. Causas geradoras dos efeitos adversos dos fluidos de corte (IGNÁCIO, 1998).

2.5.4.1. Aspectos tecnológicos

De acordo com Teixeira (2007), os fluidos de corte são substâncias auxiliares importantes para a melhoria do desempenho dos aspectos tecnológicos da usinagem nas indústrias do setor metal - mecânico, sendo que, o aumento das exigências ambientais para as indústrias, incentivou e promoveu pesquisas visando encontrar soluções para adequar os tradicionais processos de usinagem às condições de produção limpa. Com isso, nos últimos anos, a evolução das ferramentas de corte, tanto os materiais quanto os revestimentos e das máquinas-ferramenta, está promovendo uma redução significativa da necessidade do uso de fluidos de corte nos processos de usinagem.

Conforme Catai (2004), uma tecnologia adequada possibilita a aplicação correta dos fluidos de corte permitindo atingir melhor a interface peça-rebolo, o que possibilita aumentar a velocidade de corte, as taxas de avanço e a profundidade de corte, além de aumentar a vida útil da ferramenta, a precisão dimensional da peça, a diminuição da rugosidade e da

potência consumida durante o processo de usinagem, o que, conseqüentemente, resulta em aumento de produtividade e redução de custos dos produtos fabricados.

Entretanto, de acordo com Sales, Diniz e Machado (2001), as vantagens econômicas advindas da utilização dos fluidos de corte trazem, também, problemas tais como doenças ocupacionais e o descarte dos resíduos gerados, fatos estes que levaram a busca de alternativas tecnológicas, tais como: usinagem a seco e a usinagem com mínima quantidade de fluido (MQF), objetivando minimizar ou até mesmo eliminar o uso de fluido de corte.

No que se refere ao desenvolvimento de novos tipos de fluidos de corte, segundo Teixeira, Schroeter e Weingaertner (2005), a evolução tecnológica dos fluidos fez com que diversos produtos fossem empregados com fins específicos para melhorar o desempenho do fluido de corte em cada operação de usinagem, sendo que, esta evolução visou, inicialmente, o aumento da eficiência dos fluidos de corte, deixando para segundo plano as consequências nocivas aos operadores e ao meio ambiente. Porém, atualmente, com aumento da preocupação com a poluição ambiental associada à necessidade de cumprir a legislação vigente, observam-se uma tendência de reformulação na composição dos fluidos de corte, de forma a eliminar de suas fórmulas os produtos tóxicos.

2.5.4.2. Aspectos de manuseio e perdas no processo

De acordo com Byrne (1993), citado por Teixeira Filho (2006), as perdas de fluidos de corte acontecem nos componentes das máquinas, nos dispositivos de fixação e manuseio, no sistema de pressurização do ar, na formação de gotas e vazamentos e ainda nos resíduos presentes nas peças e cavacos após a usinagem, sendo que, estas perdas podem atingir, aproximadamente, 30% do volume total utilizado.

Conforme Klocke et al (2000), citado por Catai (2004), os vazamentos e perdas, emissões, água de lavagem e a incorreta disposição final dos fluidos de corte podem causar a contaminação do solo, água e ar.

2.5.4.3. Aspectos da qualidade da água

A água utilizada na preparação dos fluidos de corte deve ter uma dureza adequada, e estar isenta de impurezas, microorganismos, excesso de cloro, etc. Normalmente a água

das principais cidades é satisfatória para a preparação dos fluidos a base de água, porém é sempre desejável que um laboratório determine a quantidade de ácidos orgânicos e minerais presentes na água, bem como a sua dureza, que é dada em função dos sais dissolvidos na mesma, principalmente de cálcio, magnésio e ferro, e ocasionalmente de alumínio (BARADIE, 1996).

Dependendo da proximidade de depósitos minerais e das condições climáticas, a água dos rios e lagos podem vir ou não a ser dura, sendo que a água de poços é normalmente mais dura que as águas mais superficiais. Utilizando-se água dura, à medida que a água evapora da mistura de fluido de corte e se repõe a mesma, a concentração de ânions e cátions se eleva rapidamente.

Portanto, se a dureza da água for excessivamente elevada, haverá a necessidade de um pré-tratamento da água, abrandando-a, por deionização ou por osmose reversa. Já a ausência total ou parcial de íons, pode resultar apenas em problemas de formação de espuma (RUNGE e DUARTE, 1990).

Acidez ou alcalinidade: O valor do pH indica se o líquido é ácido, neutro ou alcalino, o controle do pH é importante, pois um pH alto (haverá fácil formação de ferrugem) ou baixo demais (Haverá problemas com a saúde do operador, podendo causar irritações na pele, que variam de gravidade de pessoa para pessoa, o fluido remove a gordura natural da pele facilitando a penetração de bactérias). O pH ideal de uma emulsão de óleo solúvel varia entre 9 e 9,3, ou seja, alcalino (BARADIE, 1996). Os principais critérios quanto ao fator pH são expressos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Principais critérios que devem ser adotados em relação ao valor do pH (RUNGE e DUARTE, 1990).

Valor do pH	Diagnóstico e/ou procedimentos
Acima de 8,7	Emulsão satisfatória para continuar em operação, adiciona-se pequenas quantidades de biocidas para a manutenção preventiva.
Entre 7,8 e 8,7	Adiciona-se biocida em quantidades suficientes para o controle das bactérias e outros materiais para corrigir a emulsão.
Abaixo de 7,8	Providenciar a troca do fluido de corte.

2.5.4.4. Aspectos da degradação microbiológica

De acordo com Rossmore e Rossmore (1995), desde que a água tornou-se um componente essencial para os fluidos de corte, os microorganismos têm sido um problema que necessita de controle e muitas estratégias têm sido oferecidas para prevenir a deterioração microbiológica, uma vez que, segundo Rossmore (1995), o resultado primário do crescimento microbiológico em fluidos de corte é a deterioração do fluido, o que pode causar perda de produção e corrosão da peça usinada e da máquina-ferramenta.

Com uma composição química complexa, os fluidos de corte tiveram um aumento proporcional de riscos ambientais e ocupacionais. Bactérias e fungos presentes podem, inclusive, gerar toxinas (ZEMAN et al, 1995).

Torna-se importante o controle microbiológico das emulsões para evitar a perda do fluido pela contaminação excessiva por fungos e por bactérias, as quais se constituem na principal causa do descarte prematuro das emulsões (RUNGE e DUARTE, 1990). As bactérias devem ser mantidas sob controle, pois é quase impossível manter uma emulsão estéril. Para tanto, o controle com biocidas deve ser feito de maneira periódica, possibilitando o controle do pH e a contagem de microorganismos. A adição de biocida não deve ser realizada somente quando for detectada sua degradação (deterioração) (SILVA, 2000).

Algumas instruções básicas para a manutenção dos fluidos são: limpar as tubulações, canalizações e reservatórios, além dos cantos mortos, possíveis focos de instalação de microorganismos; realizar a esterilização do sistema por meio de biocidas, ou mesmo, detergente; evitar pontos de estagnação de cavacos para evitar a instalação de focos de microorganismos; realizar constante aeração do fluido, coibindo o crescimento bacteriano e do mau cheiro aliado a este; sempre prezar pela higiene do local de trabalho; a monitoração destes fatores é fundamental para se prolongar a vida útil dos fluidos e dos equipamentos, além de colaborar com a saúde do trabalhador e a qualidade final das peças (RUNGE e DUARTE, 1990).

Conforme Capelletti (2006), o circuito do fluido de corte no processo de usinagem de metais é composto por várias etapas que envolvem a recirculação do mesmo por um determinado período de utilização e de exposição a condições adversas, próprias do processo, ocorrem também às paradas prolongadas de produção, sendo que, este conjunto de condições favorece a instalação e proliferação microbiana em pontos críticos do sistema e a formação de biofilmes, reduzindo a vida útil do produto e tornando o uso de biocidas um

recurso importante no controle da proliferação de microrganismos no fluido de corte, com o propósito de evitar ou retardar o processo de descarte.

2.5.5. Aspectos e impactos ambientais na utilização dos fluidos de corte

Segundo Tocchetto e Coutinho (2004), o aspecto ambiental é a causa da ocorrência de possíveis modificações no meio ambiente, enquanto impacto ambiental é qualquer modificação do mesmo, adversa ou benéfica, que resulte no todo ou em parte, das atividades, produtos ou serviços de uma organização, isto é, é a consequência ou o efeito das ações adotadas.

De acordo com Sokovic e Mijanovic (2001), o processo de fabricar um produto, pela adição de materiais e energia às matérias-primas, inevitavelmente, gera conflito a respeito das emissões e resíduos resultantes, sendo que, na busca de soluções e alternativas para aperfeiçoar os processos mecânicos é essencial que as tentativas convencionais, que visam alcançar uma eficiência máxima em associação com condições de fabricação econômica, sejam substituídas por novos métodos, os quais permitam alcançar o menor impacto ambiental em conjunto com tecnologias apropriadas e condições econômicas aceitáveis.

De acordo com Teixeira (2007), devido aos aspectos toxicológicos às condições de manuseio e uso, os fluidos de corte possuem elevado potencial de impacto ambiental, tais como: vazamentos durante armazenagem e transporte, contaminação atmosférica, etc. Além disso, representa uma ameaça à saúde do trabalhador, uma vez que pode causar males tais como: doenças pulmonares e dermatites, sendo que, leis ambientais cada vez mais rígidas, tais como a Lei nº9. 605 de 1998, Lei de Crimes Ambientais, exigem providências no sentido de reduzir o impacto ambiental dos processos produtivos e apontam o potencial de vantagens, a curto e longo prazo, que podem ser atingidos com a redução do uso desses fluidos.

Segundo Ignácio (1998), um tratamento inadequado dos fluidos de corte durante o seu período de vida, além de prejudicar o desempenho de suas propriedades, pode agravar o processo de emissões e resultar em perdas mediante a formação de gases; espumas; névoas; neblina e precipitados; oxidação dos fluidos e lançamento de fluidos para fora do sistema de circulação. A Figura 2.7 representa as inteirações dos fluidos de corte com o meio ambiente e as possibilidades de causar poluição do ar, água e solo, o que requer e justifica a implementação de boas práticas ambientais na utilização deste insumo na indústria metal-mecânica.

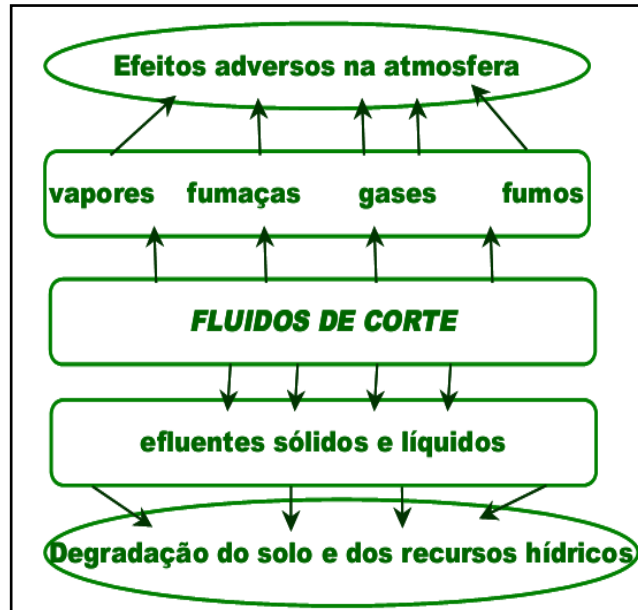


Figura 2.7. Efeitos adversos dos fluidos de corte sobre o meio ambiente (IGNÁCIO, 1998).

2.5.6. Fluidos de corte de base vegetal

Desde os anos 60 são reconhecidas as propriedades lubrificantes dos óleos vegetais. No entanto, sua utilização não era disseminada devido à necessidade de estabilização das emulsões. Por isso, os óleos vegetais eram até então utilizados principalmente em aplicações de óleos integrais. Os óleos vegetais em comparação aos minerais são mais compatíveis com a pele humana, além de reduzir a formação de vapor, fumaça e diminuir o risco de incêndios nas máquinas (segurança e saúde).

De acordo com Oliveira (2003), as antigas civilizações da Ásia e Europa utilizavam o óleo vegetal de colza em suas lamparinas. Seu uso se intensificou na Europa, após o uso da energia a vapor, quando se percebeu que o óleo vegetal de colza aderiu muito mais às superfícies banhadas por água ou vapor do que qualquer outro lubrificante.

Além disso, o óleo vegetal derivado de colza era conhecido por conter alto teor de ácidos eicosanóicos e erúcicos, sendo o primeiro saturado, com vinte átomos de carbono e o segundo insaturado, com uma dupla ligação no carbono treze.

Os óleos vegetais e seus derivados são utilizados como alimentos, produtos de beleza, tratamentos de pele, tintas, vernizes e lubrificantes, e são conhecidos desde os primórdios da história humana. Sua utilização teve início com o linho e algodão no antigo Egito, passando pela extração de óleo de azeitona pelos gregos e romanos.

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 (WOODS, 2005).

Na última década, a indústria vem tentando formular lubrificantes biodegradáveis com características superiores dos usuais baseados em óleo mineral. Dessa forma, além da catálise natural, os óleos vegetais são promissores candidatos como fluido de base em lubrificantes a fim de atingir a sustentabilidade ambiental (ASADAUSKAS e EHRAN, 2000).

Alternativas pesquisadas incluem lubrificantes sintéticos, sólidos e de origem vegetal. Devido ao potencial do óleo vegetal, há a possibilidade de serem produzidos novos produtos que mantenham propriedades semelhantes as dos produtos totalmente sintéticos e derivados de matrizes de origem fóssil. Entre estes produtos estão o éster metílico epoxidado e o biodiesel, que podem ser obtidos de diferentes óleos vegetais, os quais são de fonte renovável e contribuem para a captura de carbono da atmosfera. Se os óleos vegetais são submetidos a modificações químicas em sua estrutura, passam a ser uma alternativa mais viável de uso (CAMPANELLA, 2010).

Os derivados dos óleos vegetais, funcionalizados ou não, podem ser utilizados em misturas que compõem fluidos utilizados em atividades de usinagem. Os fluidos de corte foram empregados para melhorar o desempenho dos processos de usinagem e ganharam tal importância, sendo essenciais para a obtenção da qualidade exigida nas peças produzidas. Os fluidos introduzem uma série de melhorias funcionais e econômicas no processo de usinagem de metais. Principalmente, redução do coeficiente de atrito, refrigeração e impedimento da corrosão da peça usinada (ZEILMANN, 2011).

Os óleos integrais vegetais possuem várias vantagens que podemos destacar (KURODA, 2006).

- 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;
- Têm moléculas polares que funcionam como se fossem ímãs e se alinham 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;

A Figura 2.8 representa essa constituição molecular dos óleos minerais e vegetais.

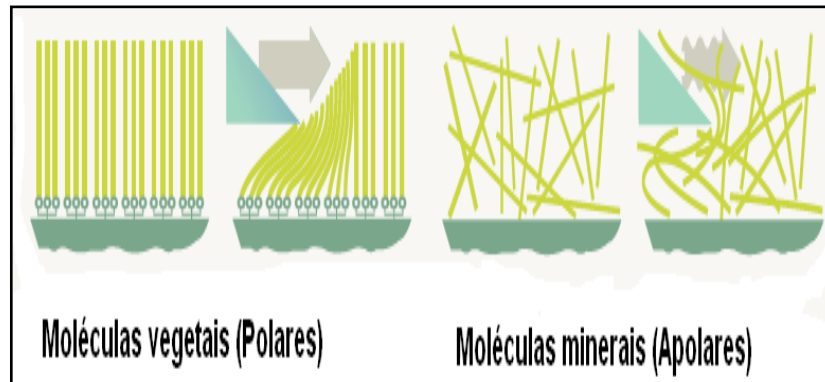


Figura 2.8. Lubricidade dos óleos vegetais e dos óleos minerais (CUTTING TOOL ENGINEERING MAGAZINE, 2005).

- 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, ao contrário dos óleos de base mineral, é que sua matéria-prima é degradável, poluindo muito menos o meio ambiente. Eles podem também ser reutilizáveis, como os de base mineral.

De acordo com Silliman (1992), os fluidos com óleos graxos, materiais graxos ou gorduras são utilizados como aditivos polares e podem ter origem, tanto animal, derivados de tecidos gordurosos de animais bovinos, ovinos, suínos ou ainda de animais marinhos tais como peixes e baleias, quanto vegetais.

Conforme Baradie (1996), os óleos graxos são muito polares, apresentam alta oleosidade, são bons lubrificantes para situações críticas e podem contribuir para a redução do calor de atrito nas operações de corte ou retificação. Entretanto, apresentam desvantagens tais como rápida rancificação provocada por oxidação e crescimento de bactérias e, conseqüentemente, desenvolvendo odores desagradáveis.

Segundo Silliman (1992), os fluidos com óleos graxos de origem vegetal são obtidos pela trituração e laceração de grãos, sementes e até frutas inteiras de plantas específicas. Esses óleos resultantes são líquidos e contêm certa percentagem de gordura insaturada e são divididos em duas categorias: secantes, que apresentam alta percentagem de ácidos graxos insaturados e não secantes aqueles que contêm menor quantidade de gorduras insaturadas. O primeiro tipo forma um filme elástico resistente quando exposto à atmosfera, devido ao contato com o oxigênio, enquanto o tipo não secante não apresenta esta característica. Os óleos vegetais do tipo não secante, tais como óleo de palma, óleo de coco

e óleo de mamona, devido ao seu baixo grau de insaturação, não necessitam de processamento adicional e são usados extensamente na produção de fluidos de corte.

Segundo Sheng (1997), embora sejam mais caros do que os óleos a base de petróleo, os óleos vegetais são mais adequados para o atendimento dos rígidos requisitos ambientais devido à sua biodegradabilidade; entretanto, esta mesma característica confere aos óleos vegetais maiores propensão à degradação microbiológica do que os óleos derivados de petróleo.

As aplicações dos óleos vegetais são as mais variadas; economia e ecologia não precisam andar necessariamente na contramão, podendo-se gerar um círculo virtuoso; observa-se que a utilização óleos vegetais de última geração é extremamente vantajosa para a saúde dos operadores e para o meio-ambiente. A única desvantagem na utilização de óleos vegetais integrais em substituição aos óleos minerais integrais é o preço inicial de aquisição, fator este largamente compensado ao verificarmos os ganhos obtidos na vida das ferramentas e na redução de consumo do produto. O óleo deve ser encarado como uma ferramenta líquida, que justifica o investimento inicial (KURODA, 2006).

A Tabela 2.5 apresenta diversas aplicações dos óleos vegetais.

Tabela 2.5. Aplicações potenciais de vários óleos vegetais (BONDILOLI, 2003).

ÓLEOS VEGETAIS	APLICAÇÕES DIVERSAS
Óleo de Canola	Óleos hidráulicos, fluidos de transmissão, fluidos para conformação de metais, lubrificantes de qualidade alimentar, lubrificantes industriais, equipamentos agrícolas, graxas biodegradáveis.
Óleo de Rícino	Graxa lubrificante de engrenagem
Óleo de Coco	Óleo para motor
Azeite de Oliva	Lubrificante automotivo
Óleo de Palma	Lubrificante de mancais de rolamento, graxas
Óleo de Linhaça	Revestimento, tintas, vernizes
Óleo de Soja	Lubrificantes, biodiesel, conformação de metal, tintas de impressão, óleo hidráulico, etc.
Óleo de Girassol	Graxas, combustível para motores diesel

2.5.6.1. Óleos comestíveis vegetais: obtenção e composição

Os óleos vegetais representam um dos principais produtos extraídos de plantas da atualidade e cerca de dois terços são usados em produtos alimentícios fazendo parte da dieta humana. Os lipídeos, juntamente com as proteínas e os carboidratos, são fontes de energia, apresentando grande importância para a indústria, na produção de ácidos graxos, glicerina, lubrificantes, carburantes, biodiesel, além de inúmeras outras aplicações (FARIA et al. 2002).

Os óleos vegetais são constituídos principalmente de triacilgliceróis (> 95 %) e pequenas quantidades de mono e diacilgliceróis. A Figura 2.9 mostra a estrutura geral de um triacilglicerol (LEHNINGER et al, 2011).

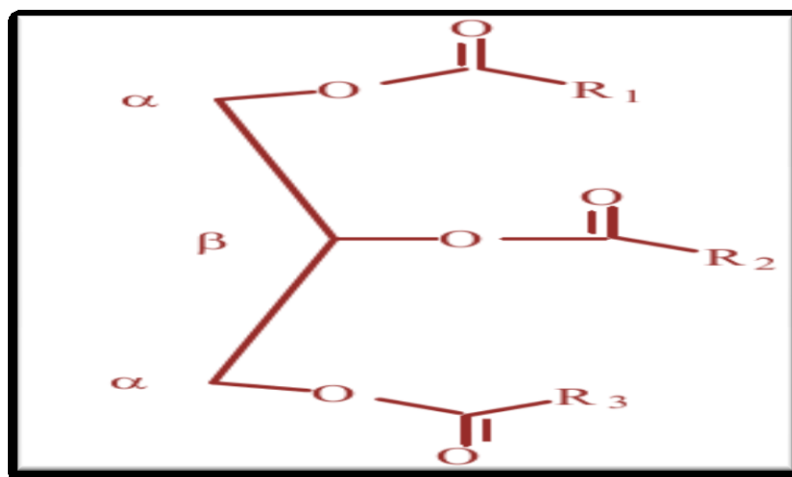


Figura 2.9. Estrutura geral de um triacilglicerol [R1, R2, R3= grupo alquil saturado ou insaturado] (LEHNINGER et al, 2011).

A estrutura de triacilgliceróis dos óleos vegetais proporciona qualidades desejáveis em um lubrificante. Longas cadeias de ácidos graxos fornecem alta resistência em um filme lubrificante, no qual ocorre uma intensa interação com superfícies metálicas, reduzindo o atrito e desgaste. Uma preocupação é a suscetibilidade de ocorrer hidrólise e oxidação do óleo, sendo assim, quantidade excessiva de água, aquecimento e contato com o ar devem ser evitados, para reduzir a formação de derivados indesejáveis (ERHAN, 2006).

A obtenção do óleo vegetal bruto é feita por meio de métodos físicos e químicos sobre as sementes de oleaginosas usando-se um solvente como extrator e prensagem. Nesta fase, o óleo vegetal contém impurezas como ácidos graxos livres prejudiciais à qualidade e estabilidade do produto, sendo necessário remover estas impurezas, pelos processos de

refino que envolve a remoção do solvente, a degomagem, o branqueamento, a desacidificação e a desodorização.

A finalidade do refino é separar as substâncias indesejáveis dos óleos brutos que possam afetar as propriedades organolépticas e a estabilidade do óleo. O processo de refino é principalmente aplicado em óleos comestíveis.

No refino químico dos óleos vegetais, que é o processo mais empregado no Brasil, os ácidos graxos livres são neutralizados por intermédio da adição de hidróxido de sódio. O sabão formado é eliminado por lavagem com água e o óleo resultante é então branqueado e desodorizado. Entretanto, nos últimos anos, por razões econômicas, tem sido utilizado o processo de refino físico para óleos vegetais, principalmente para o óleo de soja. Neste processo, na etapa de desodorização, são eliminados os ácidos graxos livres, materiais insaponificáveis, dentre outros compostos. Todavia, é necessário o emprego de temperaturas mais altas, isto é, de 210 a 230 °C, uma vez que os ácidos graxos livres não são removidos previamente. Esta operação requer menos investimento de capital e reduz a perda de óleo (DUMONT e NARINE, 2007).

Alguns problemas ambientais, tais como: perda de triglicerídeos, a necessidade de uma grande quantidade de produtos químicos, geração de efluentes contaminados e consumo energético elevado, podem ser causados pelo processo de refino convencional, onde se remove a maior parte das substâncias indesejáveis, a fim de estabilizar o óleo (BATISTA et al, 1999). As Figuras 2.10 e 2.11 mostram, respectivamente, o processo de extração e refino dos óleos vegetais

Etapas dos principais resíduos gerados no processo de refino:

- Degomagem: Quando acontece a remoção das gomas (fosfatídeos hidratáveis), ceras e substâncias coloidais.
- Neutralização: Etapa que consiste na remoção dos ácidos graxos livres com NaOH (sabões). Remoção de fosfatídeos residuais (não hidratáveis) e corantes (clorofila).
- Desodorização: Etapa na qual são removidos os odores e sabores desagradáveis, provenientes dos peróxidos, ácidos graxos livres e pesticidas - Físicos.

A estabilidade térmica dos óleos depende de sua estrutura química: óleos com ácidos graxos saturados são mais estáveis do que os insaturados. Como estes óleos são muito utilizados na culinária e na indústria, tem-se exigido de pesquisadores e técnicos especializados novos métodos analíticos capazes de avaliar as condições de processamento e estocagem, sendo, portanto, de fundamental importância o conhecimento

da estabilidade térmica dos óleos vegetais para um rigoroso controle de qualidade, (ARAÚJO, 1999).

Um dos principais fatores que determinam a estabilidade de uma substância é a sua estrutura molecular. Nos óleos vegetais, as insaturações presentes na cadeia carbônica são um alvo de ataque importante de agentes oxidantes como radicais livres, enzimas e metais que atuam como catalisadores de processos oxidativos e da foto-oxidação. Os radicais livres são compostos resultantes da quebra de peróxidos e hidroperóxidos, formados durante o processo de oxidação dos óleos e que dão origem a compostos de oxidação secundária como aldeídos e cetonas, responsáveis pelo odor desagradável (ranço).

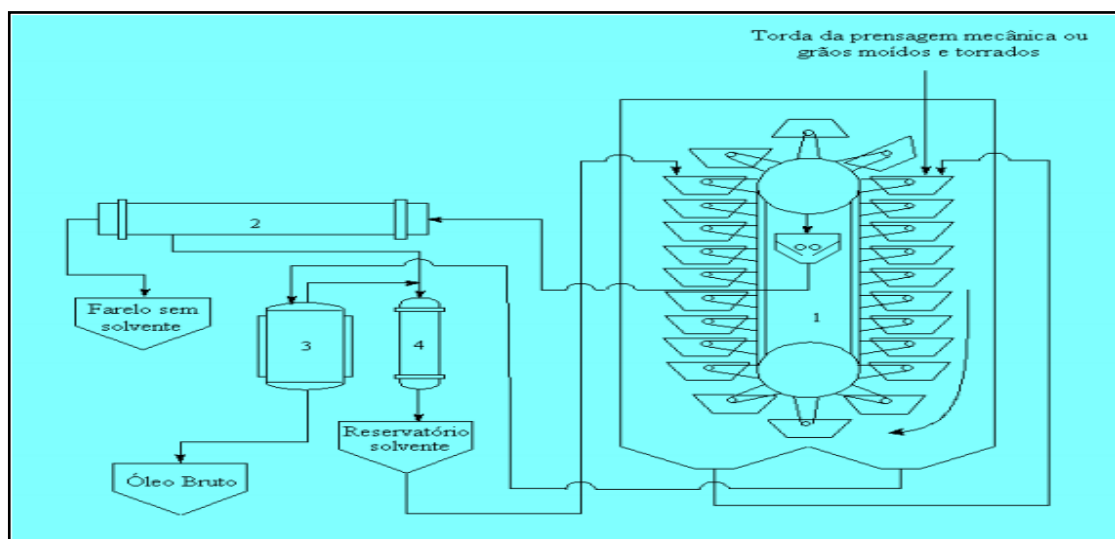


Figura 2.10. Processo de extração de óleos vegetais: (1) extrator; (2) torrefador; (3) evaporador contínuo; (4) condensador de solvente (BATISTA et al, 1999).

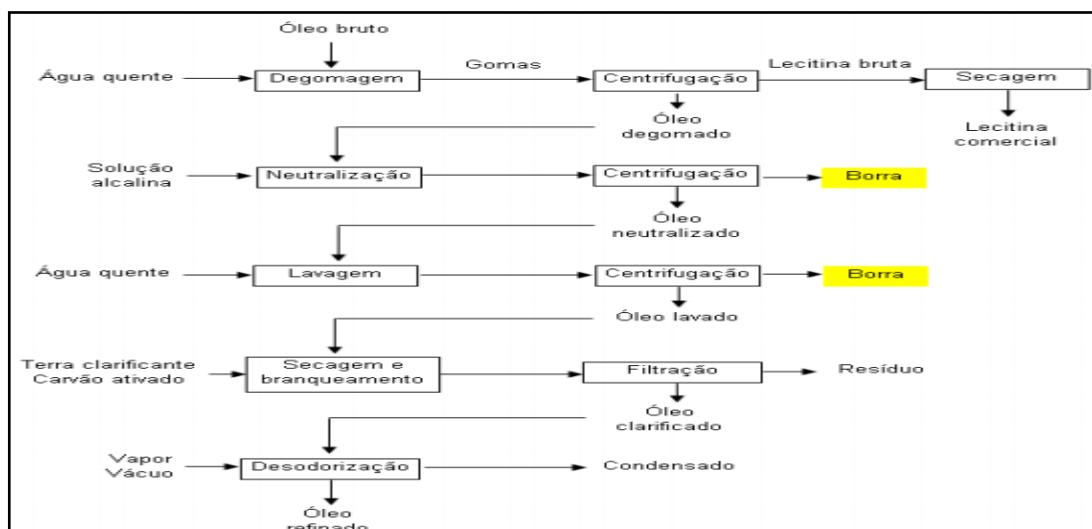


Figura 2.11. Processo de refino de óleos vegetais (BATISTA et al, 1999).

Com relação ao comportamento dos óleos vegetais sob estresse térmico, sabe-se que o aquecimento intermitente, sob a ação do oxigênio atmosférico, acelera muito o mecanismo de deterioração dos óleos e gorduras, pela ação da hidrólise, oxidação e termo-oxidação, isto também pode ser observado durante as fases de refino dos óleos vegetais (KOWALSKI, 1990).

Segundo Hellín e Clausell (1984), as modificações e alterações dos óleos e gorduras podem ser classificadas como:

- Auto-oxidação: oxidação que ocorre a temperaturas abaixo de 100°C;
- Polimerização térmica: oxidação que ocorre a temperaturas que variam entre 200 e 300°C, na ausência de oxigênio;
- Oxidação térmica: oxidação que ocorre na presença de oxigênio a altas temperaturas (oxipolimerização);
- Modificações físicas: modificações que ocorrem nas propriedades físicas;
- Modificações nutricionais: modificações nos aspectos fisiológicos e nutricionais dos óleos.

2.5.6.2. Características dos óleos comestíveis vegetais

De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária, em sua resolução RDC 482/99 ANVISA (2007), são comercializados no Brasil os seguintes óleos vegetais: Algodão, milho, palma, amendoim, soja, palmiste, arroz, uva, oliva, canola, babaçú, gergelim, girassol, coco e azeite saborizado. A maioria desses óleos é utilizada em processos industriais e na alimentação humana e animal. Em função do aumento do consumo, a produção, que pode ser obtida através de várias espécies vegetais, também tem se elevado. A seguir, são apresentadas a descrição e as características físicas e químicas (Tab.2.6) de seis destes óleos utilizados nesta pesquisa, a saber: algodão, babaçú, canola, girassol, milho e soja.

➤ DESCRIÇÃO

a) Óleo de algodão

Óleo comestível obtido de sementes de *Gossypium herbaceum* (algodão) pelo processo de extração e refino; possui alta estabilidade e está disponível também com aditivos antioxidantes, aditivos de veículos e aromas.

b) Óleo de coco babaçú

Óleo ou gordura comestível obtido da amêndoa do fruto de *Attalea funifera* (babaçú) pelos processos de extração e refino; atualmente, além das aplicações alimentícias, e na fabricação de cosméticos e produtos de limpeza, o óleo de coco babaçu também vem ganhando espaço na aplicação industrial de etanol e metanol.

c) Óleo de canola

Óleo obtido de sementes de *Brassica campestris* L. e *Brassica napus* L. (canola) pelo processo de extração e refino; sendo utilizado como lubrificante de molde em fundição de aço, aditivo e outros óleos que melhora o desempenho sob alta velocidade e pressão, vulcanização de goma elástica, em borracha sintética.

d) Óleo de girassol

Óleo comestível obtido de semente de *Helianthus annus* L. (girassol) através de processo de extração e refino; tem aplicações em diversas finalidades, na indústria cosmética, farmacêutica, alimentícia, veterinária, na fabricação de tintas, sabões, como óleo base para massagem, entre várias outras.

e) Óleo de milho

Óleo comestível obtido do germe de *Zea mays* (milho) através de processos de extração e refino; tem diversas aplicações, tais como resinas, plásticos, lubrificantes e óleos similares, uma parcela pequena deste óleo é utilizada também pela indústria farmacêutica.

f) Óleo de soja

Óleo comestível obtido de sementes de *Glycine Max* L. (soja) através de processos de extração e refino; utilizado primeiro como adubo orgânico, avançando posteriormente como fonte de óleo comestível, ração animal e matéria-prima da indústria de alimentos, cosméticos, medicamentos e tintas.

Tabela 2.6. Características físicas e químicas dos óleos vegetais comestíveis (ANVISA, 2007).

Características	Óleos					
	Algodão	Babaçu	Canola	Girassol	Milho	Soja
Densidade Relativa	0,92 (20°C) 0,93 (25°C)	0,91 (40°C) 0,92 (20°C)	0,91 (20°C) 0,92 (25°C)	0,92 (20°C) 0,93 (25°C)	0,92 (20°C) 0,93 (25°C)	0,92 (20°C) 0,93 (25°C)
Índice de Refração (n D ⁴⁰)	1,46 - 1,47	1,45 - 1,46	1,46 - 1,47	1,46 - 1,47	1,46 - 1,47	1,46 - 1,47
Índice de Saponificação	189 - 198	248 -265	182 - 193	188 - 194	187 - 195	189 - 195
Índice de Iodo (Wijs)	99 - 119	6 - 11	110 - 126	10 - 143	103 - 128	120 -143
Matéria Insaponificável g/100g	Máximo 1,5	Máximo 1,5	Máximo 2,0	Máximo 1,5	Máximo 2,8	Máximo 1,5
Acidez, g de Ácido Oléico / 100g						
Óleo Refinado	Máximo 0,3	Máximo 0,3	Máximo 0,3	Máximo 0,3	Máximo 0,3	Máximo 0,3
Óleo Semi - Refinado	Máximo 0,5	-	Máximo 0,5	Máximo 0,5	Máximo 0,5	Máximo 0,5
Óleo Degomado	-	-	Máximo 1,0	-	-	Máximo 1,0
Óleo Bruto	-	Máximo 5,0	Máximo 2,0	Máximo 2,0	Máximo 6,0	Máximo 2,0
Óleo Virgem	-	-	-	Máximo 2,0	-	-
Índice de Peróxido (meq / kg)	Máximo 10,0	Máximo 10,0	-	Máximo 10	Máximo 10	Máximo 10
Teste de Halphen	Positivo	-	-	-	-	-
Fósforo, g / 100g						
Índice de Peróxido (meq / kg)	-	-	Máximo 10	-	-	-
Óleo Degomado	-	-	Máximo 0,02	-	-	Máximo 0,02
Brassicasterol, g / 100g	-	-	Mínimo 5,0	-	-	-
Ácido Erúico g/100g	-	-	Máximo 2,0	-	-	-

2.5.6.3. Teor de ácidos graxos

O grau de insaturação do óleo tem sido considerado há muito tempo como um dos fatores mais importantes, devido à distinta reatividade dos ácidos graxos insaturados. Segundo Paul e Mittal (1997), os óleos vegetais apresentam alto índice de ácidos graxos monoinsaturados e poliinsaturados. Assim, são mais susceptíveis às alterações oxidativas e em pouco tempo se tornam rançosos e de qualidade inferior à temperatura ambiente.

A diferença nas propriedades dos diversos óleos vegetais é consequência da composição em ácidos graxos (VIEIRA ETAL, 2005). Por sua vez, as propriedades do óleo são decisivas para definir a qualidade do fluido, que é suscetível à oxidação quando exposto ao ar, o que resulta em elevação da acidez e da viscosidade, formação de gomas e sedimentos. Portanto, o perfil de ácidos graxos do óleo vegetal, utilizado como matéria-prima, é um fator importante na determinação da estabilidade.

Geralmente os ácidos graxos mais insaturados, como o linoléico e o linolênico, respectivamente, com duas e três insaturações, são mais suscetíveis à oxidação (VOSS, 2006).

Os ácidos graxos obedecem à seguinte classificação:

➤ **Ácidos graxos saturados**

É um ácido carboxílico (COOH). Estes ácidos são geralmente sólidos à temperatura ambiente. As gorduras contendo ácidos graxos saturados são chamadas de gorduras saturadas (triglicerídeos). A ligação entre carbonos é do tipo simples, conforme Fig. 2.12, exemplos de alimentos ricos em gorduras saturadas incluem banha, bacon, toucinho, manteiga, leite integral, creme de leite, ovos, carne vermelha e chocolates.

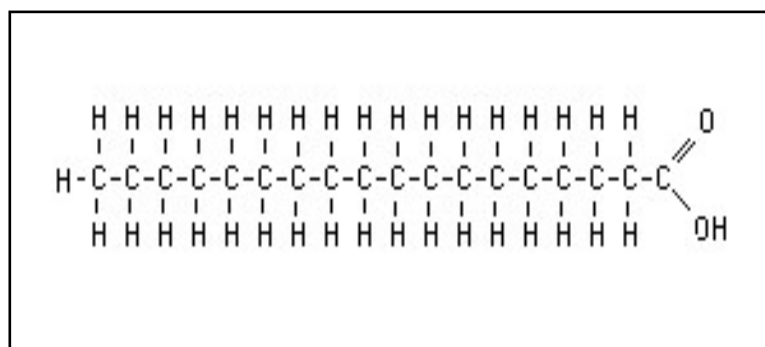


Figura 2.12. Fórmula estrutural do ácido graxo saturado (LEHNINGER et al, 2011).

➤ Ácidos graxos monoinsaturados

Os ácidos graxos monoinsaturados são encontrados no abacate, nozes, azeite de oliva e nos óleos de canola e de amendoim. A ligação entre carbonos apresentam apenas uma dupla ligação em sua molécula, conforme Figura 2.13.

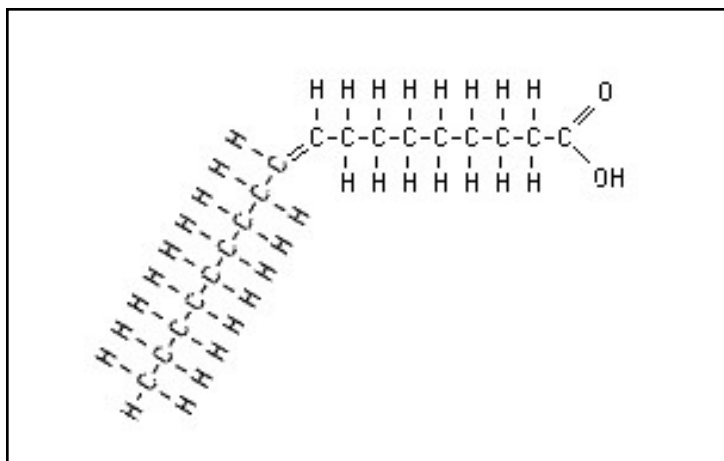


Figura 2.13. Fórmula estrutural do ácido graxo monoinsaturado (LEHNINGER et al, 2011).

➤ Ácidos graxos poliinsaturados

Os ácidos graxos poliinsaturados podem ser encontrados em óleo de girassol, óleo de milho, óleo de soja, óleos de peixe e também em oleaginosas como a amêndoa e a castanha. A ligação entre carbonos apresentam mais de uma dupla ligação em sua molécula, conforme Figura 2.14.

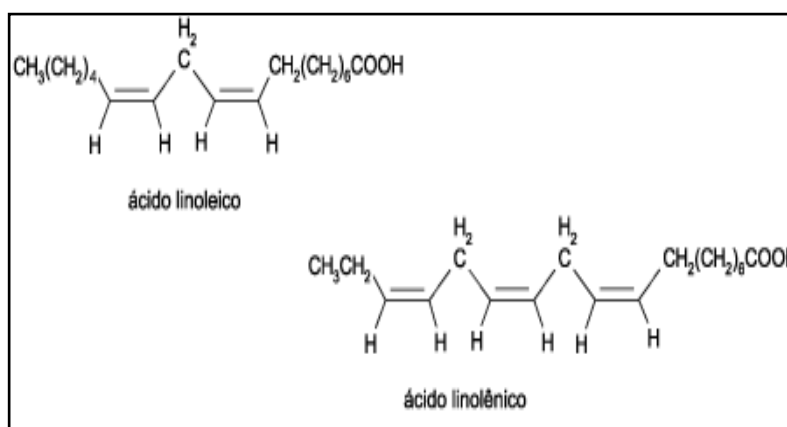


Figura 2.14. Fórmula estrutural do ácido graxo poliinsaturado linoléico e linolênico, (LEHNINGER et al, 2011).

A Tabela 2.7 apresenta os teores de ácidos graxos e a Tab. 2.8 as principais propriedades dos óleos vegetais utilizados nesta pesquisa.

Tabela 2.7. Teor de ácidos graxos em óleos vegetais (MORETTO, 1998).

ÓLEO VEGETAL COMESTÍVEL	ÁCIDO GRAXO SATURADO	ÁCIDO GRAXO MONOINSATURADO	ÁCIDO GRAXO POLIINSATURADO	
			AC. LINOLÉICO	AC. LINOLÊNICO
Canola	6%	58%	26%	10%
Girassol	11%	19%	69%	1%
Milho	13%	25%	61%	1%
Soja	15%	24%	54%	7%
Algodão	29%	16%	51%	1%
Babaçú	60%	25%	13%	2%

Tabela 2.8. Propriedades dos fluidos de corte utilizados (MORETTO, 1998).

FLUIDOS	PROPRIEDADES		
	DENSIDADE (g/cm ³)	VISCOSIDADE (mm ² /s)	PONTO DE FULGOR (°C)
LB 2000	0,920	37,0	320
Canola	0,916	35,6	325
Soja	0,919	29,5	329
Milho	0,921	32,3	325
Algodão	0,919	36,4	324
Babaçú	0,914	30,3	300
Girassol	0,918	29,1	322

2.5.7. Direções e métodos de aplicação dos fluidos de corte

Segundo Fernandes (2007), existem quatro direções de aplicação dos fluidos de corte. Conforme mostrado na Figura 2.15.

- Direção A: Aplicação convencional de fluido na forma de jorro à baixa pressão (sobre cabeça);
- Direção B: Aplicação de fluido entre a superfície de saída da ferramenta e a parte inferior do cavaco. Nesta aplicação, estudada em algumas pesquisas, o fluido é aplicado sob alta pressão;
- Direção C: Aplicação do fluido entre a superfície de folga da ferramenta e a peça;
- Direção D: Pelo interior da ferramenta (ferramentas especiais).

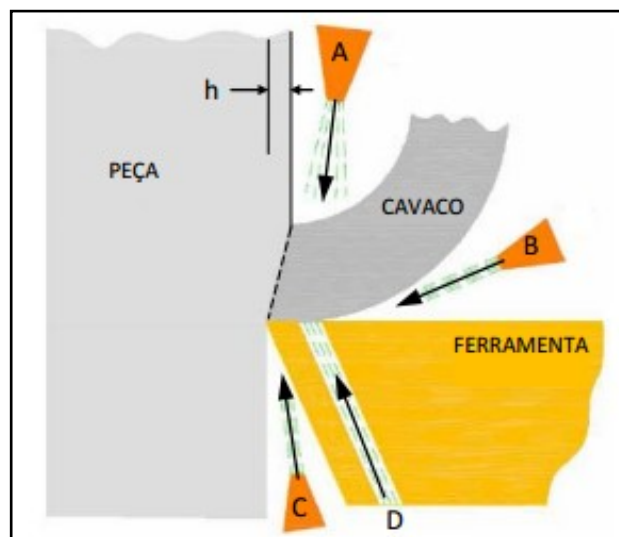


Figura 2.15. Direções possíveis de aplicação do fluido de corte (FERNANDES, 2007).

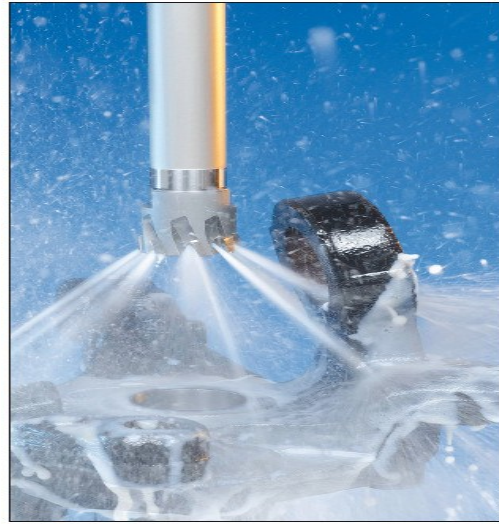
Quanto aos métodos de aplicação dos fluidos, existem basicamente três:

- Jorro de fluido à baixa pressão;
- Pulverização;
- Sistema à alta pressão.

O primeiro sistema é o mais utilizado pela sua simplicidade. O segundo método oferece vantagens sobre o primeiro devido ao maior poder de penetração e velocidade. O terceiro método é mais econômico e bons resultados foram obtidos com o seu emprego. A Figura 2.16 mostra cada sistema de aplicação de fluido de corte.



a)



b)



c)

Figura 2.16. Aplicações de fluidos de corte: a) Jorro b) Alta Pressão c) MQF (FERNANDES, 2007).

2.5.8. Técnica da mínima quantidade de fluido (MQF)

O Método de Mínima Quantidade de Fluido (MQF), que se classifica entre a usinagem com refrigeração abundante e a sem refrigeração, é aquele que utiliza apenas uma quantidade mínima de fluido dirigida por um jato de ar ao ponto onde está sendo executada a usinagem, sendo que o volume de fluido pode variar em função do volume de cavacos e do processo de usinagem. Os fluidos lubrificantes devem ter boa taxa de remoção de calor, além disso, a mínima quantidade de fluido deve ser suficiente para reduzir o atrito da ferramenta e evitar a aderência dos materiais (CNTL, 2008).

O princípio básico de funcionamento do sistema MQF consiste no arrastamento de uma pequena quantidade de lubrificante por uma corrente de ar comprimido que é dirigido sobre a zona de corte. Esse arrastamento provoca a atomização do lubrificante, fazendo com que a sua distribuição na zona de corte seja uniforme.

A utilização deste método apresenta também alguns inconvenientes. Os cavacos produzidos durante o corte são projetados em todas as direções dentro do espaço de trabalho da máquina, em vez de arrastadas, como acontece com a lubrificação abundante. Quando se trata de grandes séries de peças, a acumulação de cavacos pode constituir um problema. As máquinas-ferramentas deverão ser construídas de maneira a permitir o escoamento fácil dos cavacos para a zona inferior do espaço de trabalho e possuir sistemas de extração eficazes para evitar a sua acumulação.

Com a aplicação desta técnica, passam a existir gotículas em suspensão, resultantes da pulverização da mistura no espaço de trabalho da máquina. Este fato obriga à existência de uma vedação estanque e à instalação de um sistema de exaustão, caso contrário, o operador corre o risco de inalar gotículas dispersas no ar, que podem causar doenças respiratórias graves. A utilização desta técnica permite também uma melhor visualização e acompanhamento do processo de usinagem, devendo ser encarada como uma contribuição para a redução das emissões poluentes das indústrias transformadoras.

Diversos estudos realizados Kelly e Cotterell (2002) e Braga ET al (2002) têm demonstrado as vantagens da utilização desta técnica de lubrificação. A tendência evolutiva dos processos de lubrificação permite olhar para esta técnica como uma solução de compromisso entre a lubrificação abundante e a usinagem a seco.

No processo de retificação notou-se que os resultados diversos indicam que a técnica de MQF pode ser aplicada com eficiência no processo de retificação, reduziu razoavelmente a força tangencial de corte, permitiu a permanência das arestas de corte do rebolo por mais

tempo antes de ocorrer à renovação das mesmas, e os resultados permitiram mostrar que o método e a quantidade de aplicação de fluido de corte são fatores que exercem influências no processo de retificação (BIANCHI, 2004).

Os efeitos da utilização da técnica MQF no fresamento com alta velocidade de aços-ferramentas endurecidos são fortemente influenciados por uma série de fatores. Entre eles, os parâmetros de usinagem, material usinado, pressão, vazão, distância de aplicação, geometria usinada e material da ferramenta. Assim, resultados contraditórios com a aplicação da técnica MQF no fresamento de aços-ferramentas são encontrados na literatura (RAHMAN, KUMAR e SALAM, 2007; SU et al, 2007).

No processo de roscamento com HST notou-se que com a pequena quantidade de óleo é suficiente para reduzir o atrito no corte, diminuindo a tendência à aderência em materiais com tais características; a técnica MQL apresentou, em geral, melhores resultados que a usinagem sem fluido de corte, principalmente na redução do torque (BIANCHI, 2004).

Braga et al (2002) compararam o desempenho de uma operação de furação com refrigeração abundante em relação à utilização da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (10 ml/h de óleo em um fluxo de ar comprimido) perfurando ligas de alumínio (A356). O resultado desta pesquisa demonstrou que o desempenho do processo (em termos de força, vida da ferramenta e qualidade dos furos), quando usando mínima quantidade de lubrificação, era bem parecido ao obtido quando usado em lubrificação abundante.

A impossibilidade de aplicação da usinagem a seco em alguns casos torna necessária a manutenção do uso de fluidos de corte, porém a vazão pode ser reduzida bem abaixo das tradicionais (normalmente acima de 5 l/min). Uma drástica redução nos volumes empregados nas operações de usinagem contribui significativamente para a redução do impacto ambiental provocado por estas operações. O sucesso técnico-econômico de cada operação irá exigir uma adaptação nas características técnicas dos fluidos adequadas a esta nova condição de trabalho (KLOCKE et al, 1998). Um aspecto importante desta forma de utilização de fluido é a definição dos limites dos volumes empregados em cada caso. Como ainda não existe um termo técnico que defina claramente esta condição, os critérios usualmente aceitos são:

- Quantidade Reduzida de Fluido de Corte (QRFC) - este termo é utilizado quando a vazão de fluido empregado na operação for menor que 2 l/min para processos com geometria definida, e menor que 1 l/min por milímetro de largura de rebolo, para a retificação.

- Quantidade Mínima de Fluido de Corte (QMFC) - este termo é empregado para sistemas de névoa, onde o consumo na operação fique abaixo de 50 ml/h de fluido de corte.

A técnica de MQF se baseia no princípio de utilização total do óleo de corte sem resíduos com baixa vazão do fluido de corte que é aplicado a elevadas pressões. A função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração, mesmo que pequena, pelo ar comprimido. Esta pequena quantidade de óleo é suficiente para reduzir o atrito no corte, diminuindo a tendência à aderência em materiais com tais características (DÖRR, 1999). Por outro lado, comparado com a utilização de fluidos de corte tradicionais, a técnica de MQF propicia custos adicionais para pressurizar o ar, por exemplo. Além disso, o vapor, a névoa e a fumaça de óleo gerada podem ser considerados subprodutos indesejáveis, necessitando de um bom sistema de exaustão nas máquinas. Na pulverização utiliza-se uma linha de ar comprimido que funciona intermitentemente durante o processo. Essas linhas de ar geram ruído que costuma ultrapassar os limites de tolerância admitida pela legislação (MACHADO e DINIZ, 2000). Atualmente é possível reter grande parte desse óleo, utilizando máquinas hermeticamente fechadas, as quais possuem um sistema de exaustão, transportando os vapores (óleo, ar aquecido, impurezas) para um sistema refrigerado, fazendo com que o óleo fique retido e não polua o ambiente fabril.

É necessário, todavia, fazer alguns estudos de casos para comparar o desempenho da técnica de MQF com os resultados da usinagem a seco e com fluido em abundância, de preferência envolvendo o uso de ferramentas revestidas. O uso de MQF só é viável quando o tempo de usinagem, o tempo de vida da ferramenta e a qualidade superficial da peça forem pelo menos semelhantes às conseguidas com a usinagem usando-se os métodos tradicionais de aplicação do fluido de corte.

Rahman et al (2007) estudaram a quantia ideal de lubrificação com a técnica de mínima quantidade de lubrificação em um processo de fresamento. Com a quantia ideal estipulada, comparou-se com o processo de fresamento utilizando refrigeração abundante, analisando a força de corte, rugosidade da superfície usinada e a forma do cavaco. Os resultados deste estudo comprovaram a viabilidade (econômica e ambiental) da implementação desta técnica no processo de fresamento.

Estima-se que o custo dos líquidos lubrificantes / refrigerantes (compra, estocagem, manutenção, descarte, etc.) gira em torno de 7 a 20% do custo total de fabricação (usinagem), enquanto o custo com ferramental (suportes, insertos) varia de 2 a 4% do custo total da usinagem. Consequentemente, utilizando essa técnica inovadora (MQF), pode haver

uma redução notável dos custos, devido à redução dos fluídos de corte. A Figura 2.17 ilustra uma usinagem por fresamento com a aplicação da técnica da mínima quantidade de fluido (MQF).



Figura 2.17. Fresamento com utilização da técnica MQF (CIMM, 2009).

2.5.9. Planejamento de experimentos

As técnicas de projeto de experimentos são ferramentas com uma grande aplicação nas etapas de projeto preliminar, projeto do produto, projeto do processo de fabricação e na etapa de avaliação e de melhoria. Principalmente, porque nessas fases é necessário analisar a influência de um ou mais fatores (MONTGOMERY e RUNGER, 2009).

Os planejamentos de experimentos podem ser usados tanto no desenvolvimento do processo quanto na solução de problemas do processo, para melhorar o seu desempenho ou obter um processo que seja robusto ou não sensível a fontes externas de variabilidade. Os métodos de planejamento de experimentos podem também ser úteis no estabelecimento do controle estatístico de um processo. Por exemplo, suponha que um gráfico de controle indique que o processo está fora de controle, e que o processo tenha várias variáveis de entrada controláveis. A menos que saibamos quais variáveis de entrada são as importantes, poderá ser muito difícil trazer o processo de volta ao controle. Os métodos de planejamento experimental podem ser usados para identificar essas variáveis influentes do processo.

O planejamento de experimentos é uma ferramenta de engenharia importante para melhorar um processo de fabricação, mas tem também extensiva aplicação no

desenvolvimento de novos processos. A aplicação dessas técnicas bem cedo no desenvolvimento do processo pode resultar em: Produção melhorada, Variabilidade reduzida e Conformidade mais próxima da nominal, Tempo de desenvolvimento reduzido, Custos totais reduzidos.

A análise de variância permite analisar a variação média dos resultados dos testes, com grau de confiança conhecido, e demonstrar quais dos fatores realmente produzem efeitos (principais e de interação) significativos na resposta de um sistema. Comumente é utilizada a ANOVA de fator único (somente um parâmetro), e a ANOVA de fator duplo (dois parâmetros). No caso do estudo da influência de três ou mais fatores é necessário o uso da ANOVA para k fatores, sendo necessário o uso de softwares específicos para os cálculos. Ao final de todas as análises a saída é uma tabela onde o pesquisador obtém a correlação das variáveis e dos parâmetros, as influências individuais e coletivas dos parâmetros, o erro de estimativas e a confiabilidade dos dados (GUENZA, 2008).

De acordo com Colombari (2004), para conduzir e obter resultados de um procedimento experimental através da análise de variância é preciso analisar os valores críticos da estatística do teste, que podem ser o valor de p (p-value), F(Fisher) ou T (student), onde quanto menor for este valor, maior será a influência da variável sobre o resultado de saída.

CAPÍTULO III

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este trabalho propõe estudar o desempenho de óleos refinados vegetais comestíveis (algodão, babaçú, canola, girassol, milho e soja), utilizados como fluidos de corte na forma de mínima quantidade de fluido (MQF), durante o processo de usinagem por fresamento frontal na usinabilidade do aço ABNT 1045. A investigação foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa, verificou-se a influência de todos os fluidos utilizados em testes específicos de medição de grandezas importantes de corte (força, potência, vibração e rugosidade da superfície). Na segunda etapa, foram desenvolvidos ensaios de vida da ferramenta de corte mensurando o desgaste médio de flanco (VB_B), em função do volume removido de material (VRM). Foram realizados também testes para caracterizar as capacidades refrigerantes, lubrificantes e de molhabilidade dos fluidos de corte. Para facilitar a compreensão da metodologia utilizada, a Fig. 3.1 apresenta um fluxograma com todas as etapas experimentais realizadas.

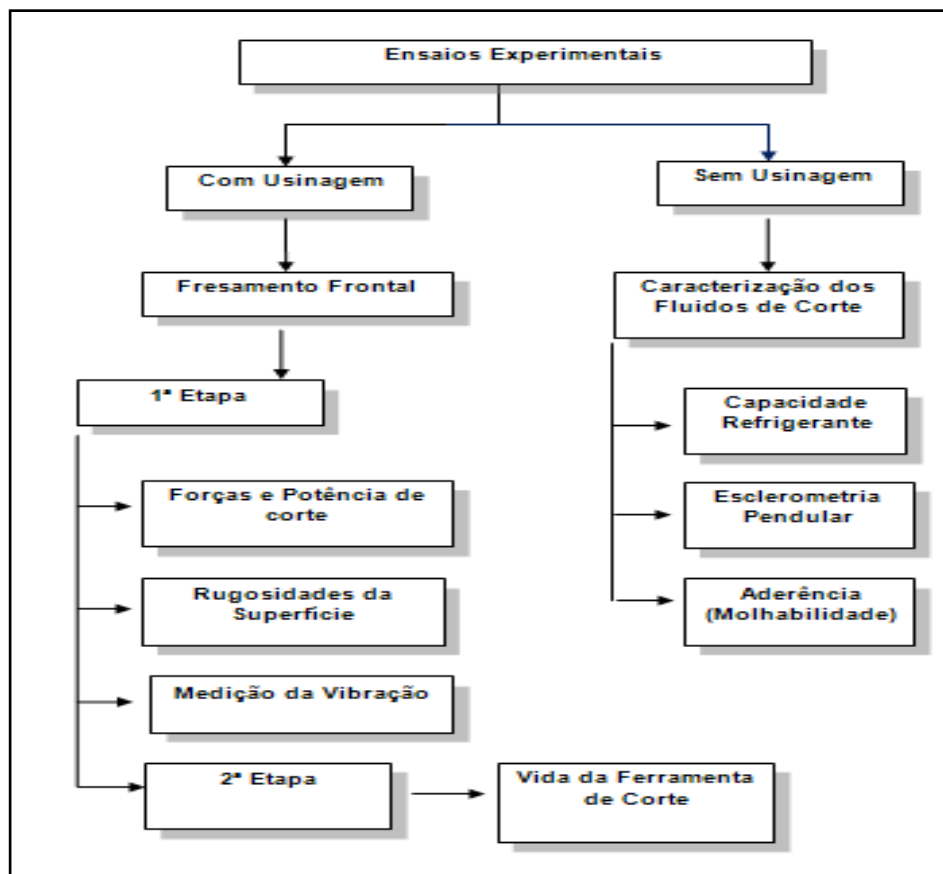


Figura 3.1. Fluxograma das etapas experimentais realizadas.

3.1. Planejamento experimental

A probabilidade de cometer um erro na análise dos resultados é identificada pelo nível de significância do teste estatístico, que no presente experimento será representado pela análise do p-value, onde este terá que ser menor que 0,05 para ser considerado como significativo sobre o resultado em análise, para um nível de confiança de 95%. Para avaliação dos dados coletados nos experimentos desenvolvidos neste trabalho, são utilizadas ferramentas estatísticas para estudar o comportamento do processo e o relacionamento entre os parâmetros de usinagem e as respectivas variáveis.

O planejamento experimental foi elaborado com base num planejamento fatorial 2^K , utilizando-se 4 variáveis de entrada ($K = 4$), sendo três quantitativas: v_c , f_z e a_p , variando em 2 níveis cada (de acordo com a recomendação do fabricante da ferramenta de corte), e uma variável qualitativa: Condição lubri-refrigerantes, que são:

- Os óleos vegetais refinados (algodão, babaçú, canola, girassol, milho e soja);
- O óleo comercial LB 2000, que é um fluido de corte também de base vegetal, lubrificante natural e biodegradável, contendo aditivos de extrema pressão para corte e usinagem de metais ferrosos;
- Um óleo de base mineral biodegradável e emulsionável a 5 % aplicado na forma de fluido em abundância (jorro);
- Condição a seco, isto é, sem utilizar fluido de corte algum.

Todos os óleos de base vegetal foram aplicados na forma de mínima quantidade de fluido (MQF), com a vazão dos mesmos variando em, 10, 50, 100 e 200 ml/h. Foi utilizada também a usinagem na condição a seco para efeito de comparação dos resultados, totalizando assim 32 combinações de parâmetros de corte, por fluido de corte.

Na Tab. 3.1 são apresentados os valores adotados nos experimentos.

3.1.1. Etapa 1 – Testes específicos de força, potência, vibração e acabamento da superfície.

A realização destes ensaios se deu a partir de um planejamento estatístico dos experimentos, considerando a matriz apresentada na Tabela 3.1. Para garantir maior confiabilidade na média dos resultados obtidos, nas condições de usinagem a seco e com emulsão/jorro, foram realizadas 2 repetições de cada combinação de corte. Já nas

condições de usinagem com utilização dos óleos vegetais pela técnica MQF foi realizada 1 repetição para cada combinação de corte, com variação nas vazões dos mesmos, totalizando assim 496 experimentos de usinagem. A Tabela completa com todas as combinações encontra-se no apêndice E deste trabalho.

A usinagem dos corpos-de-prova de aço carbono ABNT 1045 (ver características no item 3.2) foi realizada no laboratório de comandos numéricos computacionais do Departamento de Mecânica e Materiais - DMM do Instituto Federal do Maranhão - IFMA. Os mesmos foram fixos na morsa da máquina-ferramenta na mesma posição (fresamento com passada larga) e todas as usinagens utilizaram o mesmo programa CNC (ver apêndice E).

Tabela 3.1. Matriz de planejamento para os testes específicos de força e potência de corte, rugosidade e vibração - 1ª Etapa.

VARIÁVEIS										
ENTRADA				SAÍDA						
QUANTITATIVA (2 níveis)			QUALITATIVA (3 níveis)	QUANTITATIVA						
V_c (m/min)	f_z (mm/rot)	a_p (mm)	Fluidos	Forças de Usinagem (N)			Potência de Corte (KW)	Rugosidade (μm)		Vibração / Aceleração (mm / s ²)
				Fx	Fy	Fz		Ra	Ry	
165	0,15	1	- Seco - Emulsão mineral (Jorro) - Vegetal MQF (10, 50, 100, 200 ml/h)							
210	0,30	2								

3.1.2. Etapa 2 – Ensaios de vida das ferramentas de corte

O desgaste de uma ferramenta é considerado como uma perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte e é considerado como problema crítico na usinagem, pois prejudica a produção e diminui a qualidade final do produto (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006).

Define-se como sendo a vida útil da ferramenta, o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja o critério de fim de vida previamente estabelecido. Foi utilizado o método direto para avaliar o desgaste, medindo-se a geometria da ferramenta através de inspeção visual, utilizando lupas, e inspeção ótica, utilizando microscópios.

A adoção de técnicas alternativas para os ensaios de determinação da vida da ferramenta no fresamento é justificada pelo alto custo dos testes convencionais. Na prática, muitos destes ensaios são feitos com a utilização de uma quantidade de ferramentas menor do que a capacidade da fresa, mantendo o mesmo avanço por dente da condição real. Desta forma, procura-se simular a condição real utilizada na fabricação, porém com custos bem mais acessíveis (BOHES, BORGES e NETO, 1994).

Entretanto, há ainda restrições quanto à aceitação destes testes, pois a dinâmica do processo pode ser alterada pela variação do número de ferramentas na fresa. Os mecanismos de desgaste, as tensões de impacto, a fadiga mecânica e a formação de trincas térmicas podem não seguir o mesmo comportamento da operação real (CHANDRASEKARAN e THOORS, 1994; TLUSTY, 1984; RICHETTI, MACHADO, Da SILVA, EZUGWU e BONNEY, 2004).

No fresamento, a utilização de fresas com pastilhas intercambiáveis como ferramentas de corte é comum em setores de fabricação. As fresas disponíveis comercialmente apresentam uma capacidade de ferramentas bastante variada, podendo ser 4, 6, 8, 10 ou mais ferramentas. Os custos dos testes para a determinação da vida da ferramenta podem ser significativos quando envolvem um grande número de ferramentas por fresa. Isto ocorre não apenas pela perda de uma grande quantidade de ferramentas, mas principalmente porque um grande volume de material deve ser retirado para que o critério de fim de vida de uma das ferramentas seja atingido.

Nesta etapa foram desenvolvidos testes de vida da ferramenta de corte, testando os dois óleos vegetais aplicados como fluidos de corte que apresentaram os melhores desempenhos na etapa 1 (algodão e canola) e também as condições seco e o óleo LB 2000,

a fim de comparações das médias dos resultados. Foi realizado também um planejamento fatorial 2^2 com as seguintes variáveis (v_c e f_z), mantendo-se a_p constante. Baseado nos experimentos preliminares foi assumido como critério de fim de vida da ferramenta de corte o desgaste médio de flanco (VB_B) igual a 0,35 mm. Foram utilizadas duas velocidades de corte (v_c alta e v_c baixa) e dois avanços (f_{z1} e f_{z2}) como forma de avaliar a capacidade lubrificante dos fluidos aplicados, para cada experimento foi realizada duas repetições, totalizando 48 experimentos de usinagem. A matriz desta etapa é apresentada na Tab.3.2.

Tabela 3.2. Matriz de planejamento para os testes específicos de vida da ferramenta de corte - 2ª etapa.

Parâmetros Fixos ou Constantes				
- Material da peça: Aço ABNT 1045; - Ferramenta de corte: Fresa Coromil 345 da Sandvik Coromant com 1 inserto de metal duro revestido (PM 4240); - Máquina Ferramenta: Centro de Usinagem Discovery 560 (Romi); - Penetração de trabalho (a_e): 62 mm; Profundidade de corte (a_p): 2 mm; - Vazão do fluido (MQF): 50 ml/h				
Experimentos	Variáveis ou Fatores de Entrada Condições de corte			Variáveis de Saída Vida da Ferramenta de corte considerando um $VB_B = 0,35$ mm conforme norma ISO 8688-1/ 89
	V_c (m/min)	f_z (mm/min)	Fluido de corte	Volume de Material Removido (VRM) cm^3
01	210	0,20	A Seco	
02	450	0,20	A Seco	
03	210	0,30	A Seco	
04	450	0,30	A Seco	
05	210	0,20	Fluidos vegetais	
06	450	0,20	Fluidos vegetais	
07	210	0,30	Fluidos vegetais	
08	450	0,30	Fluidos vegetais	

3.2. Caracterizações do material

O material utilizado para o procedimento experimental foi o aço carbono ABNT 1045. Os corpos-de-prova foram obtidos a partir de barras laminadas redondas, com diâmetro inicial de 5 polegadas (estas barras foram usinadas e transformadas em barras retangulares, para facilitar a montagem e a fixação das mesmas durante os ensaios), sem tratamento térmico e sem acabamento superficial com dureza de 205 HB (dureza Brinell), e composição química equivalente ao aço C 45, em conformidade com a norma ISO / R 683-3, de acordo com a Tabela 2.1 apresentada anteriormente, sendo que este valor de dureza encontra-se dentro da faixa especificada para este material em aplicações na indústria (ver apêndice D).

3.2.1. Corpos de prova

Nos testes da primeira etapa, específicos de força e potência de corte, acabamento superficial e vibração, foram utilizados corpos de prova com dois furos de 15,9 mm de diâmetro para melhor fixação dos mesmos na base dinamométrica. Nos testes da segunda etapa, de vida da ferramenta de corte, os corpos de prova não possuíam tais furos, pois foram fixados diretamente na mesa do centro de usinagem. No total foram utilizadas 40 barras retangulares nas duas etapas, com as dimensões do comprimento, altura e largura, respectivamente de 250 x 77 x 62 mm, conforme as Figuras 3.2 e 3.3.

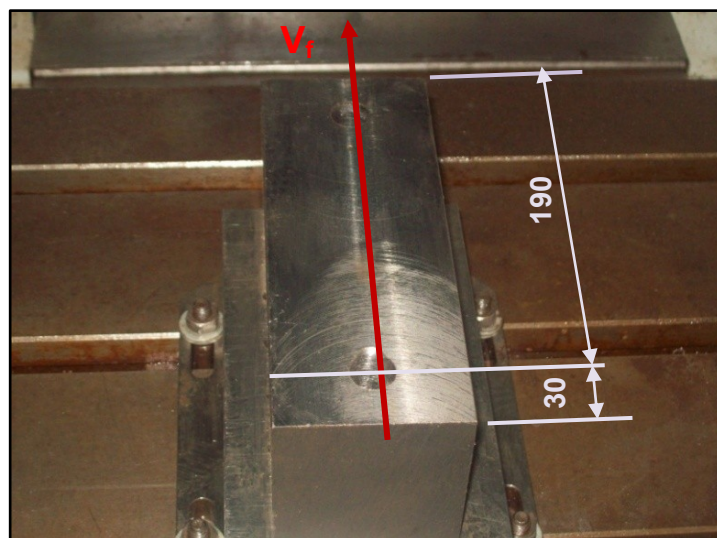


Figura 3.2. Corpos de prova utilizados nos ensaios de força, potência, vibração e acabamento superficial.

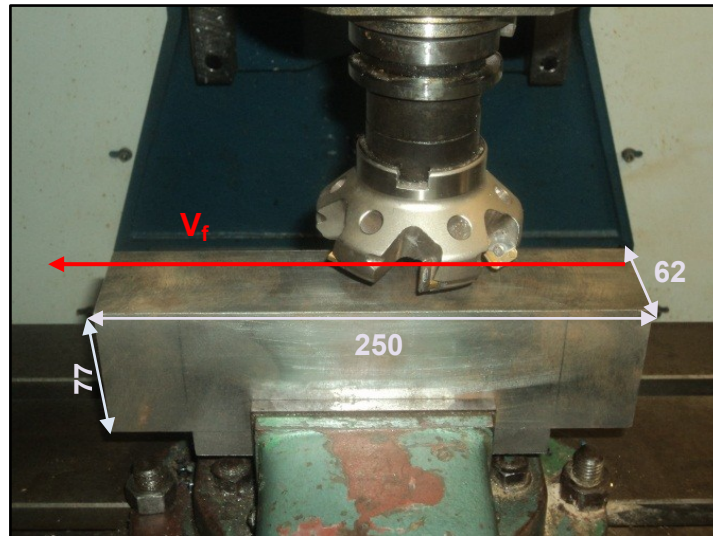


Figura 3.3. Corpos de prova utilizados nos ensaios de vida da ferramenta de corte.

3.2.2. Metalografia dos corpos de prova

A observação metalográfica permite explicar as propriedades e o comportamento mecânico de uma peça metálica, já que permite conhecer a estrutura do material, os seus constituintes micro-estruturais (fases), bem como a morfologia e a distribuição destes.

A preparação metalográfica consistiu em lixamento, polimento e ataque com o reagente Nital 2%, para posterior observação utilizando o microscópio óptico Olympus, no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), bloco 1R, FEMEC / UFU. As Figuras 3.4 a 3.6 apresentam detalhes desta preparação.



Figura 3.4. Detalhe da retirada da amostra na peça, escolha das seções para análise metalográfica.

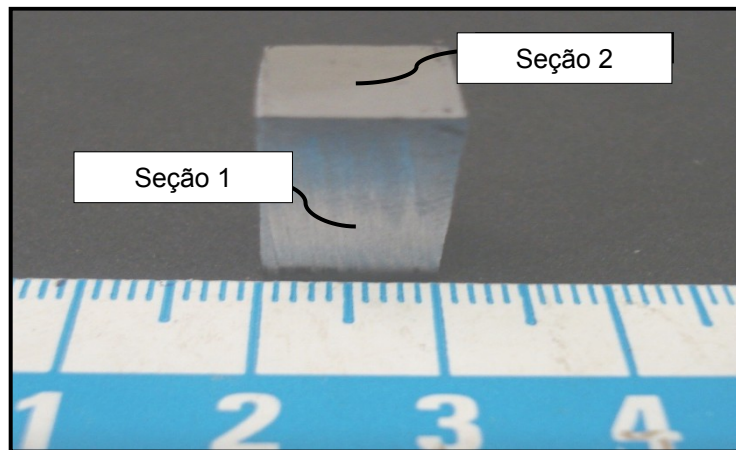


Figura 3.5. Detalhe e identificação das seções escolhidas para análise; Seção 1 - perpendicular (ou transversal) e Seção 2 - paralela (ou longitudinal) à direção de laminação da barra.

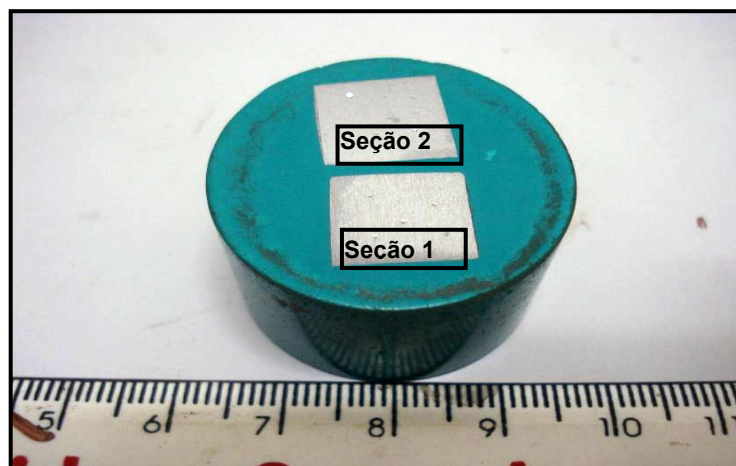


Figura 3.6. Amostras embutidas em baquelite prontas para serem lixadas e polidas.

3.2.3. Microestruturas do material

A caracterização da microestrutura do material estudado e as medidas de dureza obtidas foram todas realizadas nos corpos de prova da etapa 1 e são apresentadas nas Figs. 3.7 e 3.8 e na Tab.3.4, respectivamente. A microestrutura da seção longitudinal da barra de aço ABNT 1045 apresenta um alinhamento devido ao processo de conformação, mas não apresenta diferença de dureza em relação à seção transversal. As regiões mais escuras são constituídas de perlita e as mais claras de ferrita.

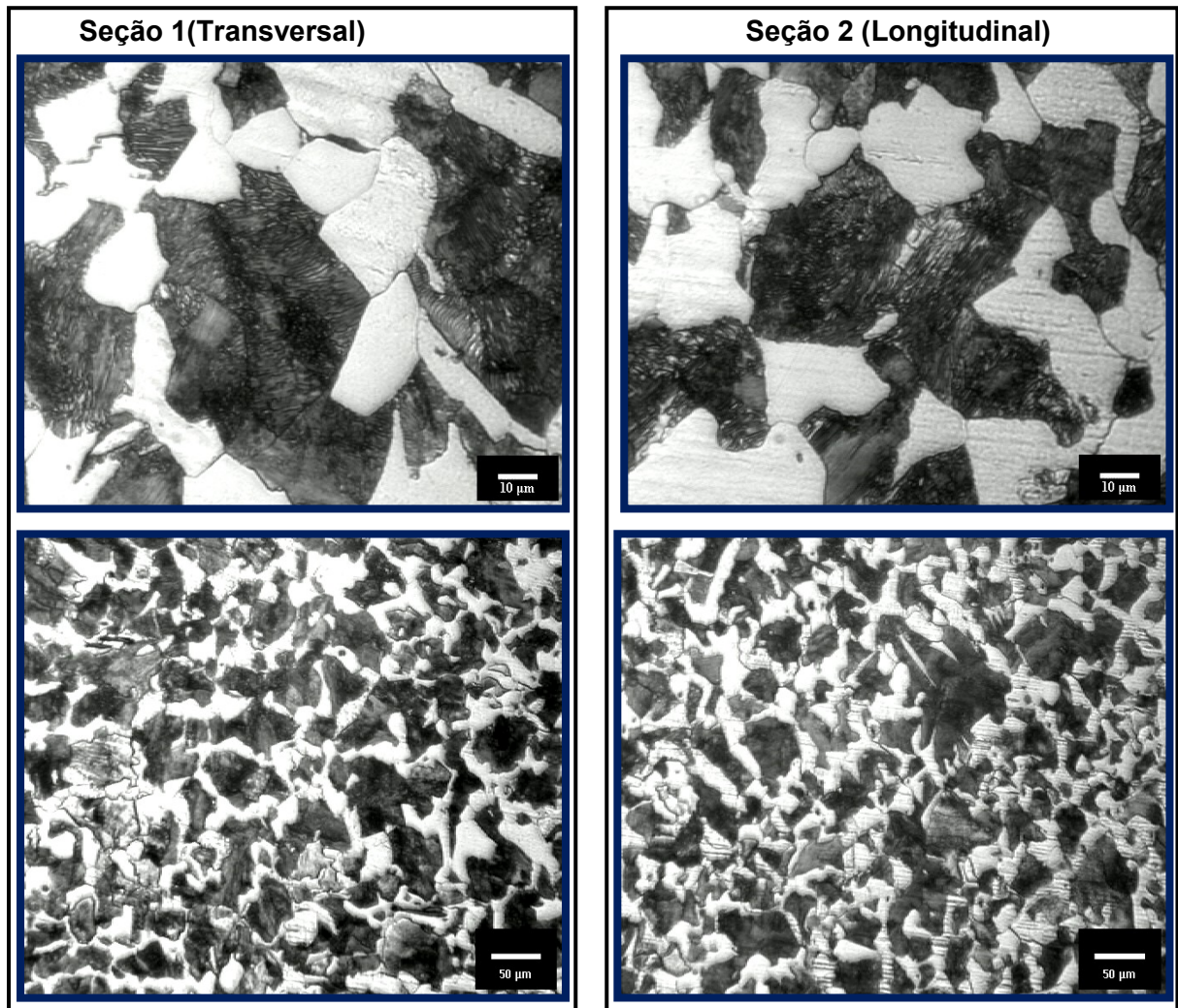


Figura 3.7. Microestrutura das seções do aço ABNT 1045 (ataque a Nital 2 %).

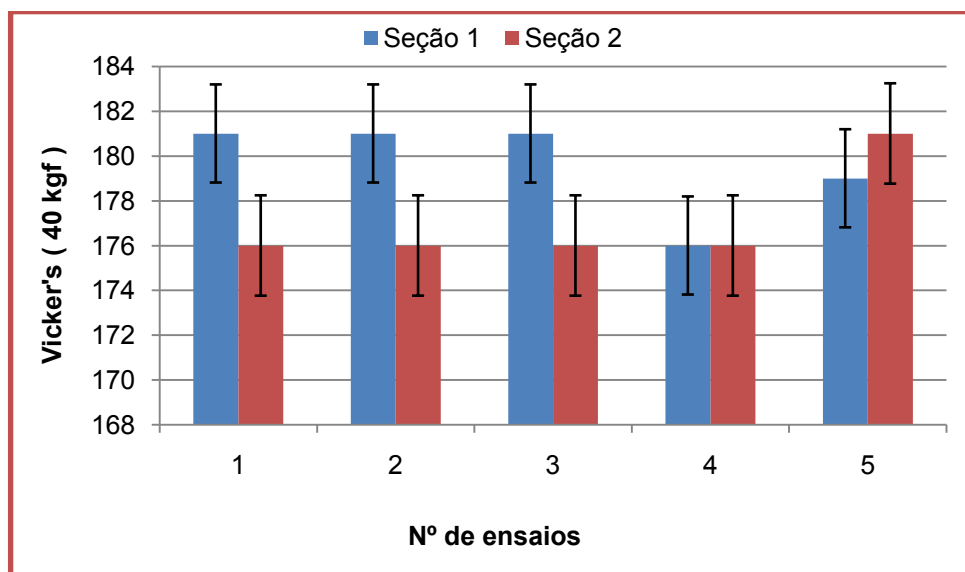


Figura 3.8. Gráfico do ensaio de dureza do material.

3.2.4. Ensaio de tração

Como forma de avaliar o material em uso nos experimentos, no caso o aço ABNT 1045, procedeu-se a um ensaio de tração que é um ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido às vantagens de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais. Foram confeccionados 5 corpos de prova, conforme norma ABNT 6152/2002, cujos comprimentos coincidem com as direções longitudinais das barras. A Figura 3.9 mostra um corpo de prova utilizado antes e após o ensaio, e a Fig. 3.10 mostra as curvas tensão - deformação convencional.

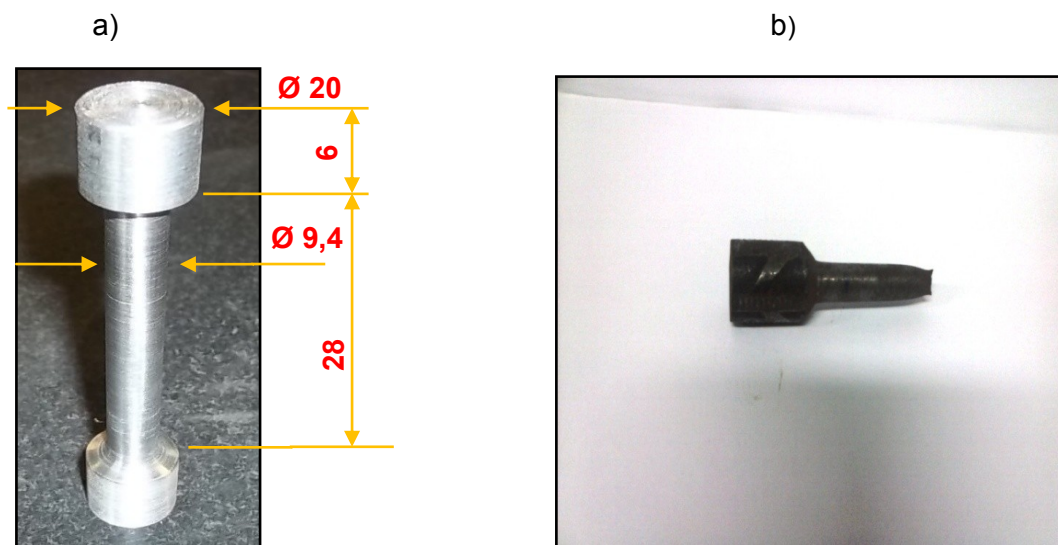


Figura 3.9. Corpo de prova utilizado no ensaio de tração: a) antes e b) após.

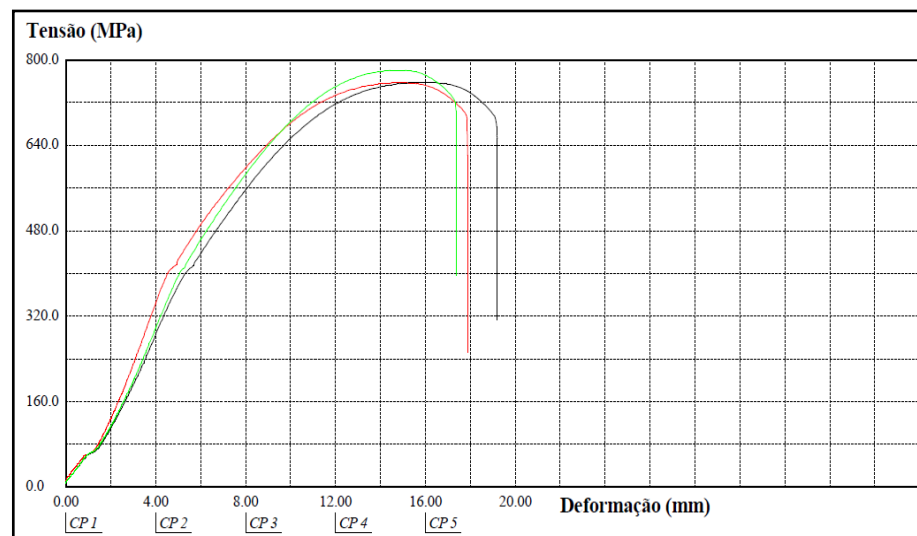


Figura 3.10. Curvas Tensão - Deformação convencional.

3.3. Equipamentos e ferramentas

Em geral no desenvolvimento de uma pesquisa experimental, se faz necessária a utilização de diversos recursos materiais, como forma de mensuração dos dados gerados nos ensaios. Serão especificadas em seguida todas as máquinas, ferramentas, acessórios e equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

3.3.1. Máquina ferramenta

Para os ensaios de usinagem, utilizou-se o centro de usinagem vertical fabricado pela Romi/Bridgeport, modelo Discovery 560, ano de fabricação 2001, conforme Fig. 3.11, que utiliza o comando numérico CNC GE SIEMENS 21i-MB. As principais especificações dessa máquina são o deslocamento no eixo X de 560 mm, 406 mm no eixo Y, 508 mm no eixo Z e a velocidade de deslocamento da mesa em avanço rápido é de 40 m/min. O eixo-árvore possui uma rotação máxima de 7500 rpm, potência máxima de 12,5CV e a interface de fixação de ferramenta no fuso da máquina é do tipo sede cônica ISO-40.



Figura 3.11. Máquina - Ferramenta utilizada nos ensaios.

3.3.2. Ferramenta de corte / inserto de metal duro

A ferramenta utilizada no processo foi a fresa código 345 - 080Q27 - 13M (Sandvik - Coromant) - Diâmetro de 80 mm e capacidade para 6insertos (na pesquisa, para economia de material e ferramentas, só foi utilizado 1 inserto, sem causar problema de desbalanceamento), e o cone código 52. 33.527 (Sandvik - Coromant), de acordo com a Figura 3.12.



Figura 3.12. Ferramenta (fresa / cone) utilizada nos ensaios.

O inserto utilizado no procedimento experimental foi de formato quadrado, com pastilhas dupla face com oito arestas de corte (calço para proteção do assento da pastilha e apoio total da mesma, isto assegura uma vida útil mais longa do corpo da fresa). Com profundidade de corte máxima de 6 mm, diâmetro do círculo inscrito (IC) de 13 mm, comprimento efetivo da aresta de corte (LE) de 8,8 mm, comprimento da aresta alisadora (BS) de 2 mm, espessura da pastilha (S) de 5,6 mm, raio de canto (RE) de 0,8 mm, ângulo de ponta de 90°, ângulo de saída de 24°, gerado pelo quebra cavaco, ângulo de posição de 45° e código Sandvik 345R-1305M-PM, revestimento TiCN + Al₂O₃ + TiN, aplicado pela técnica MTCVD (deposição química de vapor em médias temperaturas), a geometria do quebra cavaco é do tipo M-PM. Aplicada somente em fresamento a classe GC 4240 é uma classe de metal duro tenaz com cobertura para operações mais exigentes em fresamento de aço. Para conceitos de fresa de topo e cantos a 90 graus, deve ser usada em condições mais estáveis, como balanços curtos, faceamento, fresamento de cantos rasos, etc. Para outros conceitos, inclusive o da atual aplicação, a classe GC4240 é a primeira ou uma

escolha alternativa em operações difíceis. O material de base (metal duro) é constituído com microgrãos tenazes, de acordo com a Figura 3.13 (SANDVIK COROMANT, 2011).

Observa-se que ela possui uma aresta alisadora BS, para aplicação a 45° , que gera bons acabamentos da superfície.

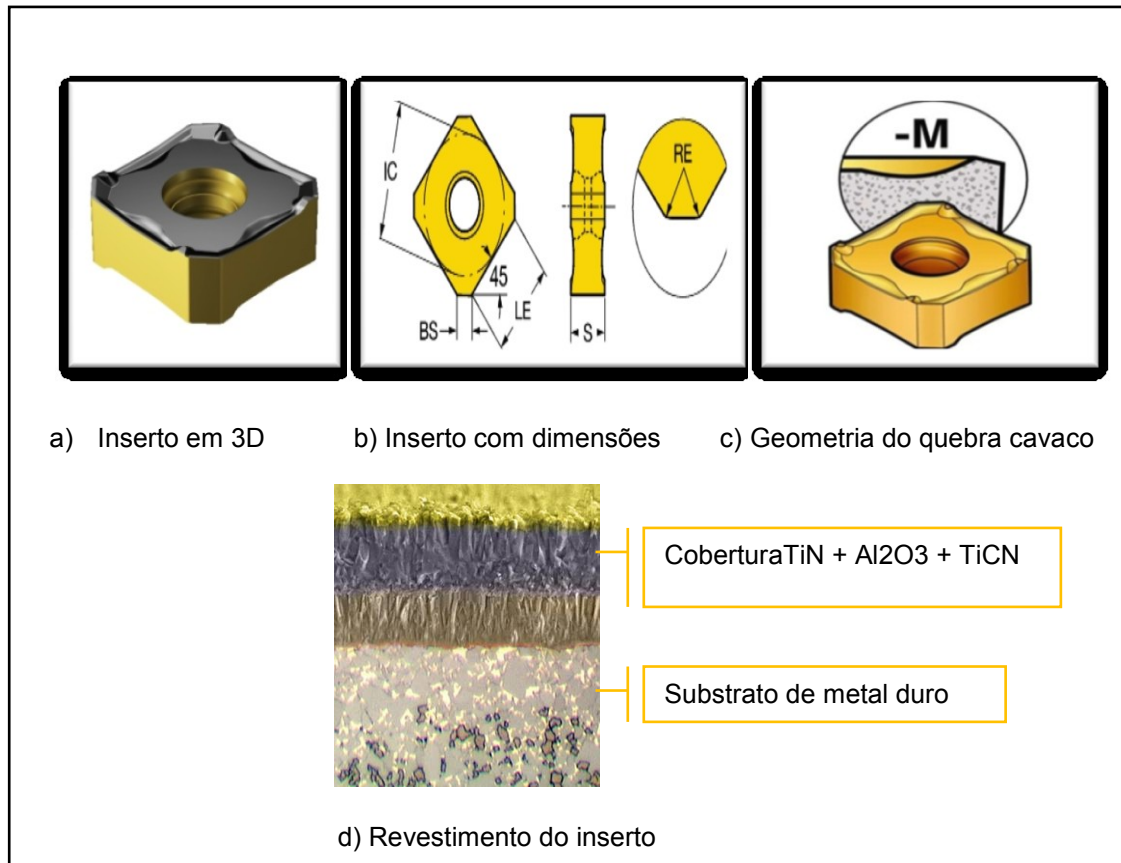


Figura 3.13. Inserto utilizado nos experimentos (SANDVIK COROMANT, 2011).

3.3.3. Microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura

Para auxiliar na mensuração do desgaste médio de flanco (VB_B), utilizou-se um microscópio óptico com câmera digital estereoscópico modelo Q7735S - ZT, 30 W de potência do fabricante Quimis; Nas análises realizadas foi aplicado um aumento de 45 vezes, de modo a obter o valor de desgaste dos inserts de corte. Para análise dos mecanismos de desgaste da ferramenta de corte, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da Hitachi Tabletop Microscope, modelo TM 3000 Magnification 15 ~ 30000x (digital zoom: 2,4x), acceleration voltage 5.0 - 15.0KV, conforme Figura 3.14.

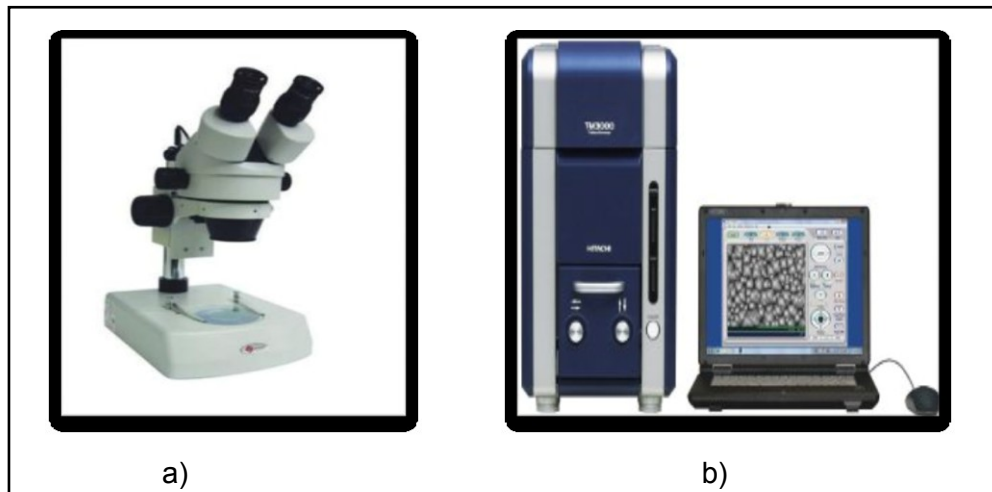


Figura 3.14. Equipamentos auxiliares para mensurar o desgaste médio de flanco (VB_B) e analisar o mecanismo de desgaste das ferramentas de corte: a) Microscópio Estereoscópico; b) Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

3.3.4. Sistema de aplicação do fluido de corte

Utilizou-se um aparelho aplicador de micro - lubrificação, modelo Accu – Lube fabricado pela ITW Chemical, operando com um fluxo contínuo de ar comprimido, ajustado em torno de 6 Kg/cm^2 , e “spray” intermitente de fluido na frequência de 1 pulso por segundo. Este sistema consiste de um reservatório para o fluido de corte com alimentação manual, válvulas para regulagem do fluxo de ar e de óleo, manômetro, mangueiras condutoras (ar comprimido e fluido) e 2 bicos com base de fixação magnética, para aplicação externa da mistura ar comprimido-fluido sobre a ferramenta-peça, conforme a Figura 3.15.



Figura 3.15. Aplicador de micro-lubrificação (MQF).

3.4. Metodologias utilizadas na aquisição de dados

3.4.1. Sistema de medição das forças e potências de usinagem

Procedeu-se às medições das componentes da força de usinagem na primeira etapa, considerando que a montagem da ferramenta não apresenta inclinação no eixo de rotação e utilizou-se um único inserto para garantir maior precisão na profundidade de corte e evitar diferenças de altura de um inserto em relação ao seguinte, o que provocaria uma variação de forças desnecessariamente.

Inicialmente fixou-se o dinamômetro Kistler (modelo 9257 B) na mesa do centro de usinagem, tomando-se o cuidado para garantir um perfeito alinhamento dos eixos do dinamômetro com os eixos da máquina, usando-se para isso um relógio comparador. Pode-se, assim garantir a qualidade dos sinais amplificados pelo condicionador de sinais Kistler (modelo 5006). Em seguida fixou-se os corpos de prova, conferidas todas as fixações, a montagem da ferramenta, o pre-setting da ferramenta e após conferir o programa CNC (ver apêndice F, programas forças de usinagem e vida da ferramenta de corte), pode-se assim iniciar os testes. O fresamento frontal foi realizado longitudinalmente à barra, com centro da fresa coincidindo com o centro da largura fresada de 62 mm. Este procedimento foi em função do diâmetro da fresa ser maior que a largura da peça o que gera menores esforços no caso do corte assimétrico. As condições de corte, conforme apresentado na Tab. 3.1, eram alteradas a cada passada. As leituras das forças se iniciaram quando a fresa atingiu um percurso de avanço maior que seu raio. A aquisição dos sinais foi realizada conectando o condicionador de sinais a uma placa de conversão analógica - digital da Measurement Computing, modelo USB 1208SF, 1,25 MS/s. Esta placa transmitiu os sinais das componentes das forças nas direções X, Y e Z para um computador utilizando o software Delphi 7.0. Os parâmetros para a aquisição dos sinais foram: tempo de aquisição de 120 segundos e taxa de aquisição 1000 Hz por canal, após ajustes implementados conforme calibração auferida do fabricante. A orientação dos eixos do dinamômetro foi concorrente aos da máquina. A direção de avanço ficou alinhada ao eixo x do dinamômetro. Foi efetuada a troca dos insertos após 4 passes sobre o corpo de prova. Com isso, descartou-se da análise a influência do desgaste da ferramenta (em nenhuma condição o desgaste médio de flanco VB_B passou de 0,1 mm). A metodologia de captação do sinal de força é ilustrada na Figura 3.16.

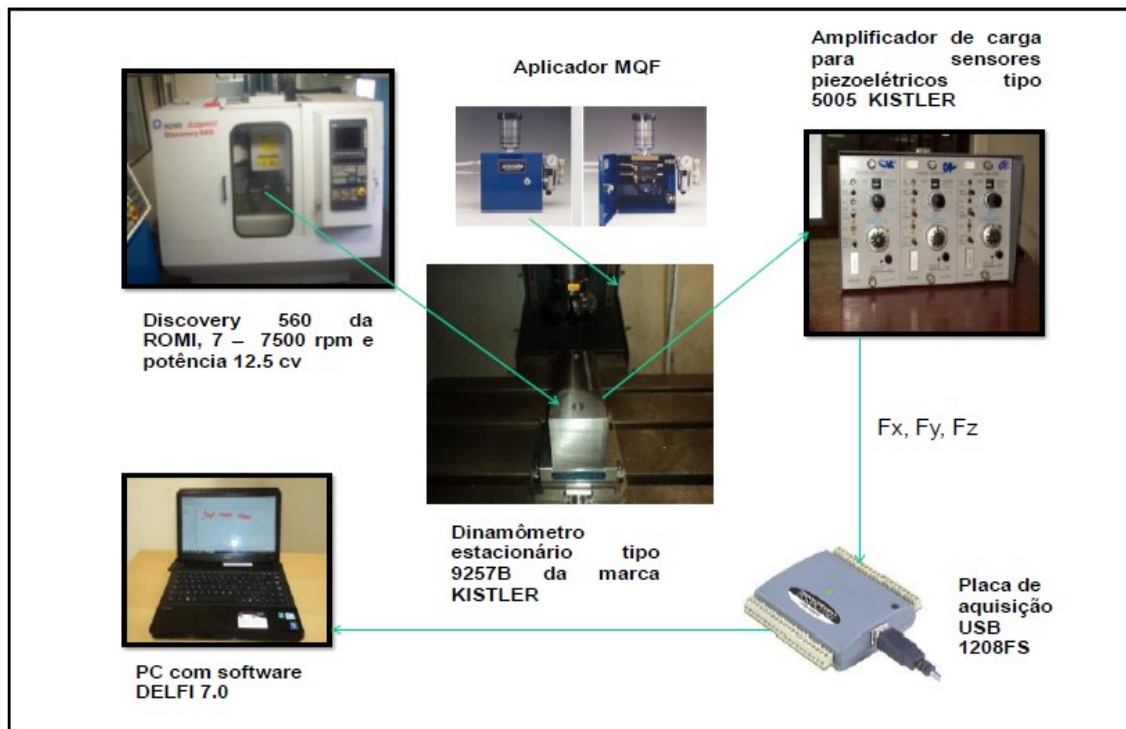


Figura 3.16. Sistema de aquisição das forças de usinagem (Fx, Fy, Fz).

No caso da potência de corte (P_c), foi obtida em função da força de corte (F_c), como sendo o produto da força de corte com a velocidade de corte (v_c), conforme a Equação 3.1.

$$P_c = (F_c \cdot V_c) / (60 \cdot 10^3) (kW), \quad (3.1)$$

Onde: F_c é a força de corte em N e V_c é a velocidade de corte em m/min.

3.4.2. Sistema de medição da vibração

As deformações e o atrito entre o cavaco, a ferramenta de corte e a peça produzem vibrações. As oscilações da força de corte também contribuem com o processo. A fim de medir as variações do sinal de vibração durante o processo de usinagem da peça, foi utilizada a montagem representada na Figura 3.17. O sistema é constituído por acelerômetros (sensores MV 670 da INSTRUTHERM), coletores de dados de vibração, software de aquisição modelo SW - U801 e computador. O sensor é fixado na peça dentro do centro de usinagem e após cada passada é monitorado o sinal de vibração na forma de aceleração.

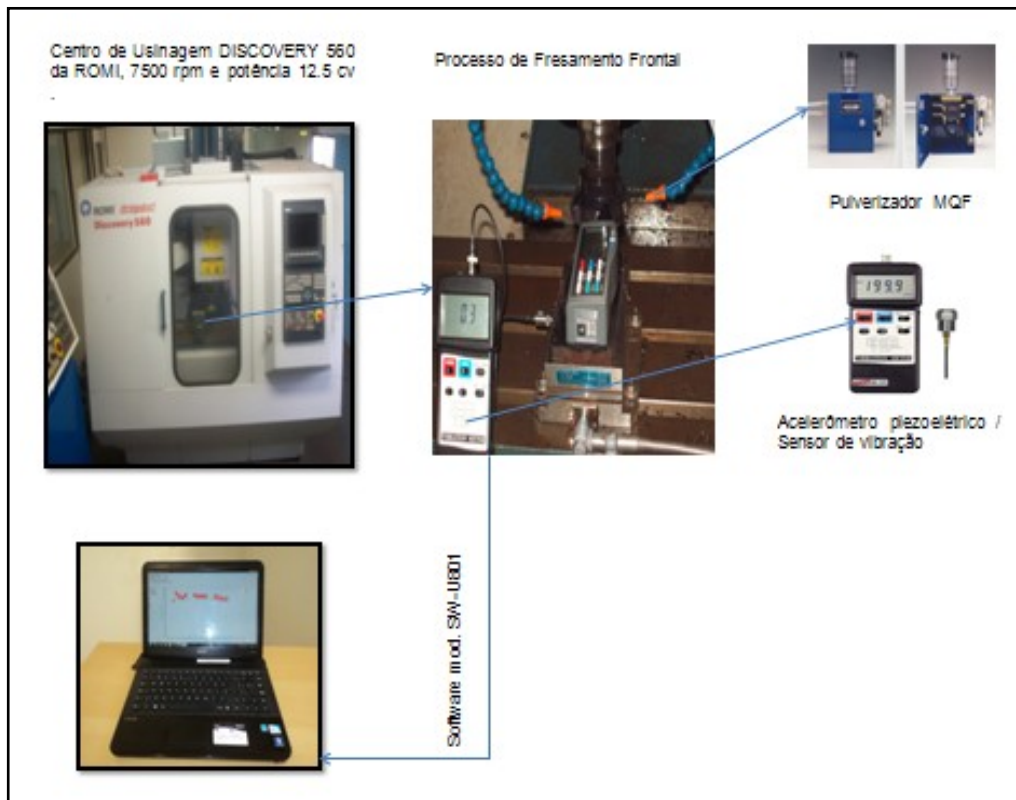


Figura 3.17. Sistema de aquisição dos sinais de vibração / aceleração (mm / s^2).

3.4.3. Sistema de verificação do acabamento superficial (rugosidades)

A rugosidade de uma superfície usinada é o resultado da combinação de alguns fatores que ocorrem durante o processo de fabricação tais como as condições de corte, geometria da ferramenta, geometria da peça, rigidez da máquina - ferramenta, material da peça e material da ferramenta. A rugosidade média (R_a), determinado em função da linha média M do perfil de rugosidade e a rugosidade máxima (R_y), definido como o maior valor das rugosidades parciais (Z_i) que se apresenta no percurso de medição (l_m), foram avaliadas na superfície fresada da peça, utilizando-se um rugosímetro digital modelo TR 220 do Time Group Inc., com resolução de $0,01\mu\text{m}$ e comprimento de amostragem cut-off (l_c) de 0,8 mm. A rugosidade foi medida 5 (cinco) vezes em diferentes posições da superfície do corpo do prova após cada passada; foi utilizado o Sistema M – linha média que divide as áreas do perfil de rugosidade (mais usado). No Brasil, as Normas NBR ISO 4287/2002 e NBR 8404/1988 indicam o uso do sistema M. A Figura 3.18 apresenta o esquema de controle das rugosidades.

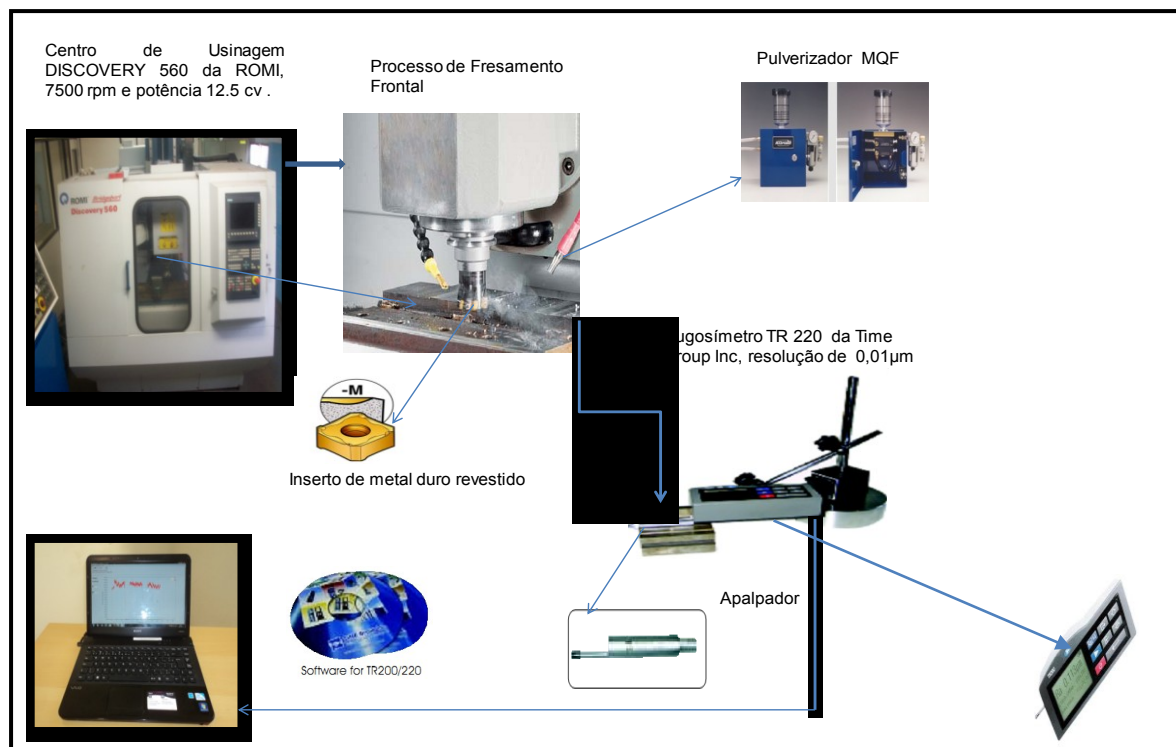


Figura 3.18. Esquema de controle das rugosidades (Ra e Ry em µm).

3.4.4. Sistema de determinação da vida da ferramenta de corte (verificação do desgaste médio de flanco VB_B)

A barra de aço de seção quadrada usada nos testes foi preparada no fresamento nas dimensões de 62 mm lado e de 250 mm de comprimento. Todas as faces da barra foram desbastadas previamente na fresadora. Um programa foi realizado na linguagem ISO, compatível com a máquina e com flexibilidade de realizar vários desbastes seguidos com interrupção para medição do desgaste. Após a execução de um número especificado de desbastes, o programa era interrompido e o inserto era retirado para medição do desgaste. Caso não tivesse atingido o critério de final de vida ($VB_B = 0,35$ mm), novos desbastes eram executados. A Figura 3.19 apresenta o microscópio óptico com a ferramenta posicionada para medição do desgaste de flanco.

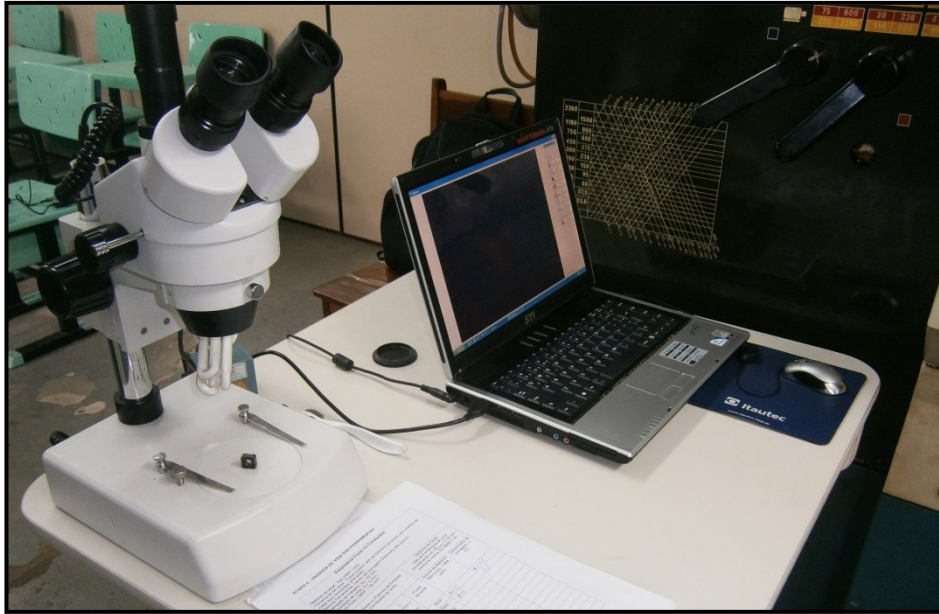


Figura 3.19. Sistema de medição do desgaste médio de flanco (VB_B) da ferramenta de corte.

3.5. Metodologias utilizadas na determinação da capacidade lubrificante, refrigerante e de molhabilidade dos fluidos de corte

A literatura mostra vários testes visando avaliar o desempenho de fluidos de corte, divididos em duas categorias: Com usinagem e Sem usinagem. Esta etapa do trabalho consistiu em propor e testar uma metodologia com objetivos de determinar a capacidade de lubrificação e refrigeração dos óleos vegetais utilizados como fluidos de corte e também a capacidade de molhabilidade (aderência) dos mesmos. Estes ensaios são muito importantes para caracterizar e classificar os óleos testados, auxiliando fortemente nas análises e conclusões dos ensaios que envolvem usinagem. Para a capacidade lubrificante e refrigerante, foram adotadas as mesmas metodologias utilizadas por SALES, (1999).

3.5.1. Metodologia para verificar a capacidade refrigerante dos fluidos de corte

Atualmente se faz a avaliação da capacidade refrigerante de fluidos de corte via teste calorimétrico, que é um método realizado estaticamente, e não leva em consideração o aspecto dinâmico envolvido na usinagem. Foi adotada aqui uma metodologia que desse esta dinâmica ao processo de medição e que se aproximasse ao máximo das condições

reais de fabricação, objetivando determinar a capacidade de refrigeração de cada óleo vegetal utilizado como fluido de corte. Foram utilizados os óleos refinados vegetais (algodão, babaçú, canola, girassol, milho e soja), o óleo LB 2000 vegetal comercial e a condição a seco. O aparato experimental é esquematizado na Figura 3.20.

Legenda:

- (I) Corpos de prova (antes e depois dos ensaios);
- (II) Aquecimento dos corpos de prova (300 °C);
- (III) Fixação do corpo de prova na placa do torno mecânico, colocação do termopar e pulverização da peça;
- (IV) / (V) Conjunto de aquisição do sinal de temperatura (placa / termopar);
- (V) Computador com software de aquisição.

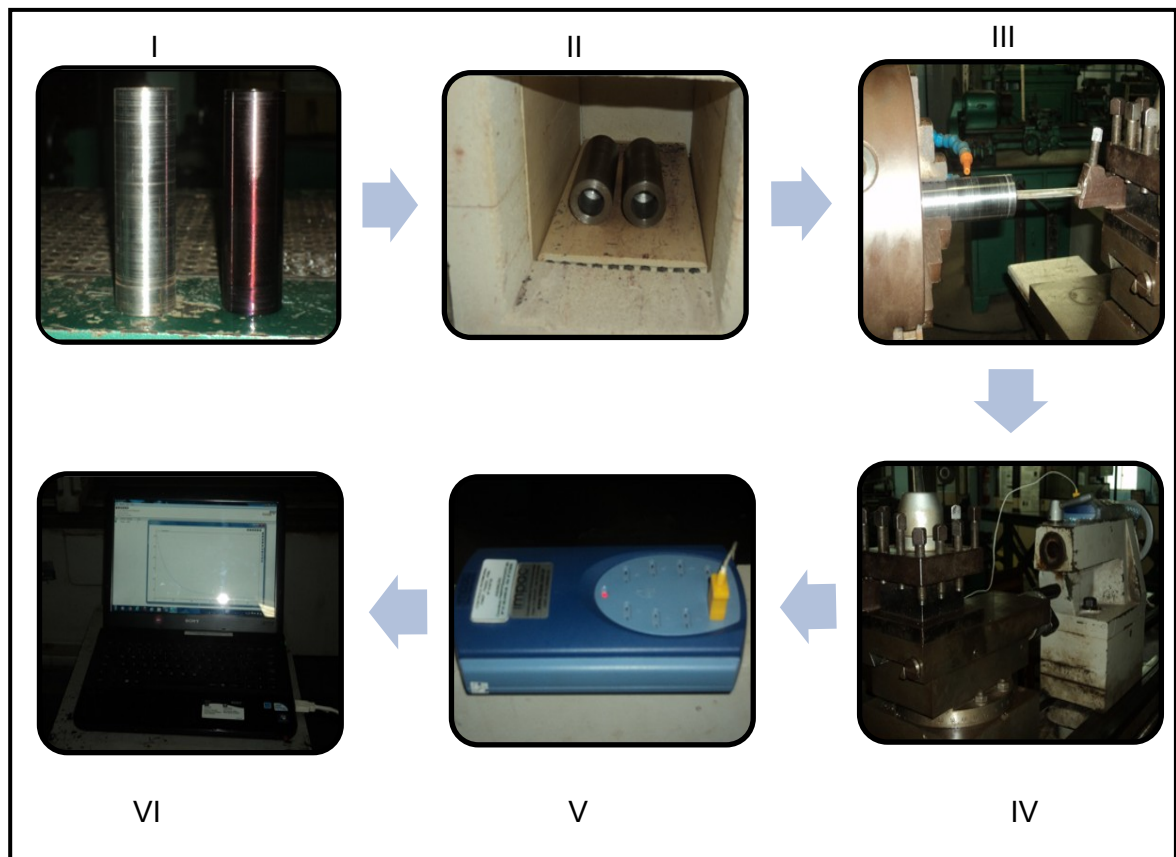


Figura 3.20. Aparato experimental para determinação das curvas de resfriamento.

O ensaio de verificação da capacidade refrigerante dos fluidos de corte proposto por Sales (1999) consiste em aquecer um corpo de prova, que no caso escolheu-se o aço ABNT 1045, por meio de um forno de resistências elétricas, até uma temperatura de aproximadamente 350 °C, por 1 hora. Depois de aquecido, o corpo é retirado do forno e

fixado na placa de um torno mecânico. Para dar uma característica dinâmica ao ensaio, a árvore do torno foi colocada a girar a uma rotação de 150 RPM. O fluido de corte aplicado pela técnica de mínima quantidade de fluido (MQF), com vazão ajustada em 200 ml/h é jogado sobre o corpo de prova. A Figura 3.21 mostra o desenho do corpo de prova de aço ABNT 1045, utilizado nos ensaios.

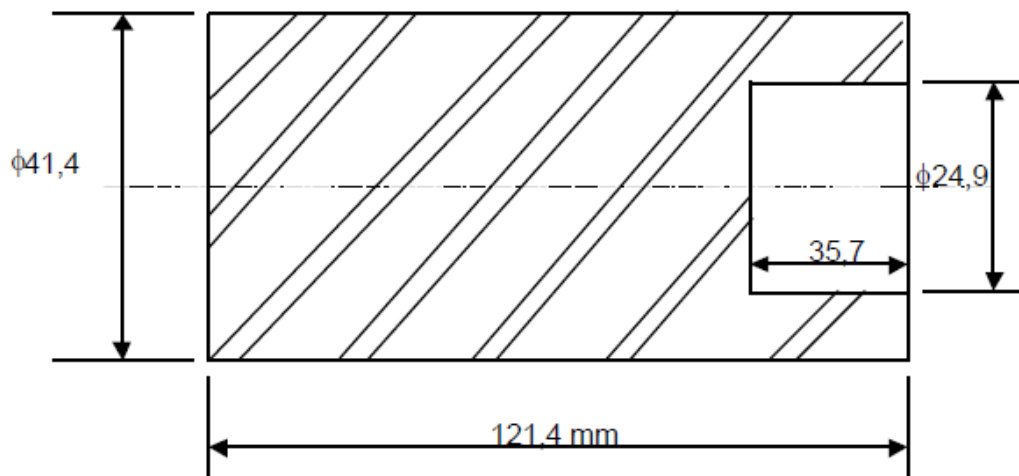


Figura 3.21. Corpo de prova utilizado nos ensaios de capacidade refrigerante dos fluidos.

Com objetivo de diminuir respingos de fluidos, o fluxo foi direcionado de uma forma angular em relação ao eixo do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 3.20. Pode se fazer uma avaliação simultânea da capacidade de refrigeração e de molhamento (ou umectação, que depende da sua tensão superficial) dos diversos fluidos.

O jato de fluido inclinado somente tangencia o corpo de provas que, a altas temperaturas o rebate, sem ser coberto pelo mesmo. Com a diminuição da temperatura, o fluido começa a “molhar” mais a sua superfície, que é uma característica de cada fluido testado. A temperatura do corpo de prova é registrada por um termopar tipo K (encostado no final do furo do mesmo), com sensibilidade de aproximadamente $41\mu V/^{\circ}C$, acoplado a uma placa com entrada USB, que envia o sinal a um microcomputador com software de aquisição, (ver Figura 3.20). A aquisição se iniciava quando a temperatura medida na superfície, no interior do furo no corpo de prova, atingisse $300^{\circ}C$ e ela parava quando esta temperatura fosse inferior a $40^{\circ}C$.

Aplicou-se o Critério Chauvenet de rejeição de dados (Wonnacott e Wonnacott, 1985), com a finalidade de retirar os pontos discrepantes que aconteciam devido a erros presentes

no processo, tais como vibração, oscilação magnética e interferências eletromagnéticas externas. Um gráfico temperatura em função do tempo é obtido para cada fluido em teste.

3.5.2. Metodologia para verificar a capacidade lubrificante dos fluidos de corte

Neste ensaio pretendeu-se verificar a capacidade de lubrificação dos fluidos de corte, em um procedimento que não envolvia usinagem. Utilizou-se a técnica de esclerometria pendular, inicialmente desenvolvida com o objetivo de se estudar o desgaste abrasivo dos materiais. Neste trabalho ela foi utilizada como uma técnica de caracterização do desempenho dos fluidos de corte.

O ensaio consiste em produzir um risco em uma amostra com a topografia da superfície conhecida, por meio de um penetrador de geometria definida. O penetrador é fixo na extremidade de um pêndulo, com massa de 2,86 kg, liberado de um ângulo de 154°, atingindo uma velocidade de 4,1m/s (246m/min). O sistema possui, inicialmente, uma energia potencial armazenada de 19 J, após a execução do risco, o pêndulo atinge determinada altura. Uma escala graduada no instrumento registra diretamente a energia consumida no ensaio. Trata-se de uma técnica muito parecida com o ensaio Charpy, usada para determinar transição dúctil-frágil de materiais. A superfície da amostra está submersa em uma camada de fluido de corte de aproximadamente 3 mm. A amostra foi pesada antes e após o risco por meio de uma balança digital da ART LAB, modelo MARTE AS 1000, com resolução de 10^{-2} g. Calcula-se a energia específica de riscamento, "e", que é definida como a relação entre a energia dissipada para produzir o risco, "E", e a perda de massa produzida, " Δm ", conforme a Equação 3.2 (FRANCO, 1989).

$$e = E / \Delta m \text{ (J / Mg)} \quad (3.2)$$

Onde E é a energia dissipada para produzir o risco em Joule e Δm a perda de massa em miligramas.

A energia específica de riscamento é um parâmetro representativo da resistência à abrasão dos materiais. Com isto, um material com elevada energia específica de riscamento deve apresentar uma boa resistência ao desgaste (FRANCO, 1989). A profundidade máxima do risco foi variada por meio de um parafuso com passo de rosca micrométrico, que eleva ou abaixa a mesa com a amostra, entre 40 e 250 μm . A energia consumida no risco é lida diretamente no instrumento em uma escala devidamente calibrada. Como forma de obter a perda de massa de aproximadamente 20 mg nos corpos de prova em todos os

ensaios, padronizou-se a altura da mesa em 200 μm , o que dava uma profundidade de riscamento máxima em torno de 0,03 mm.

Na preparação dos corpos de prova, uma amostra com seção transversal de 12 mm de espessura foi cortada de uma barra de aço ABNT 1045 com seção circular de 102 mm de diâmetro. Da amostra foram seccionados paralelepípedos de 11 X 11 X 60 mm³, por meio de corte com um disco abrasivo de SiC, com a utilização de fluido de corte emulsionável. Uma fita adesiva contornava o corpo de prova de maneira a formar uma camada de 3 mm, a partir da superfície preenchida com o fluido de corte (óleos) a ser testado. A Figura 3.21 ilustra estes corpos de provas.

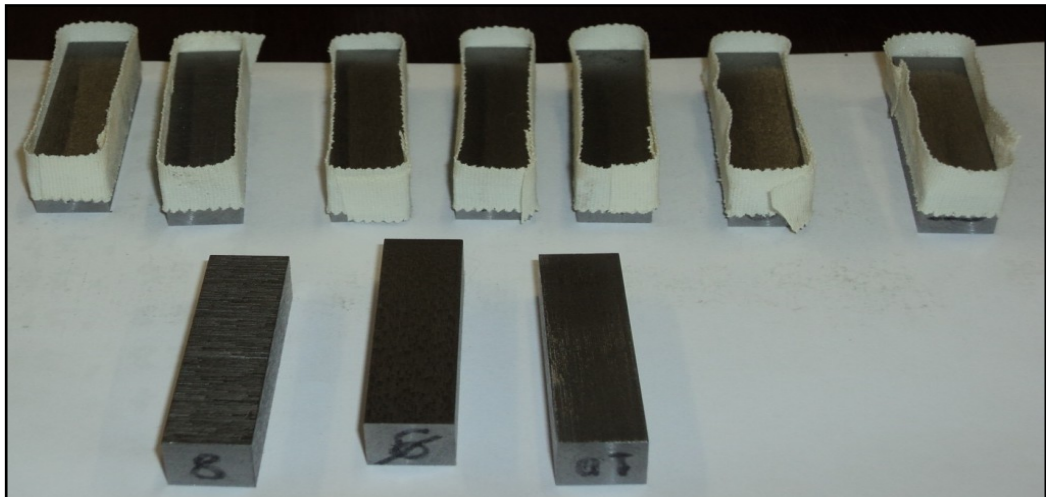


Figura 3.22. Corpos de prova utilizados nos ensaios de verificação de perda de energia específica média (esclerometria pendular).

De uma barra de seção quadrada de 5 mm de aresta, sinterizada de WC e Co, foi fabricado um penetrador piramidal de base quadrada. As faces retificadas sofreram lapidação até o abrasivo SiC 600 mesh, seguido de polimento em pasta de diamante de 3 μm . Para impedir a fragilização da ponta, foi feito um truncamento, de forma que esta apresentasse uma base quadrada de 0,48 mm de lado, conforme Fig.3.22, medidas em um sistema analisador de imagens. Após cada risco, a face de ataque do penetrador era analisada com uma lupa, com capacidade de ampliação de 25 vezes. Na existência de material aderido, ou pequeno desgaste na ponta do penetrador, a face era novamente polida com pasta de diamante de 3 μm .

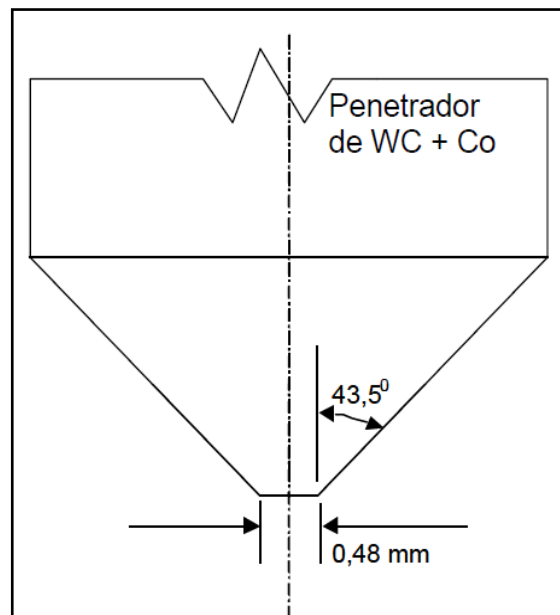


Figura 3.23. Detalhes da geometria da ponta do penetrador (FRANCO, 1989).

Pretende-se avaliar por meio da energia específica, o desempenho de lubrificação de cada fluido em estudo. O esclerômetro pendular utilizado neste trabalho foi projetado, construído e avaliado por (FRANCO, 1989). O Esquema do aparato experimental e os detalhes dos ensaios são apresentados nas Figuras 3.23 e 3.24.

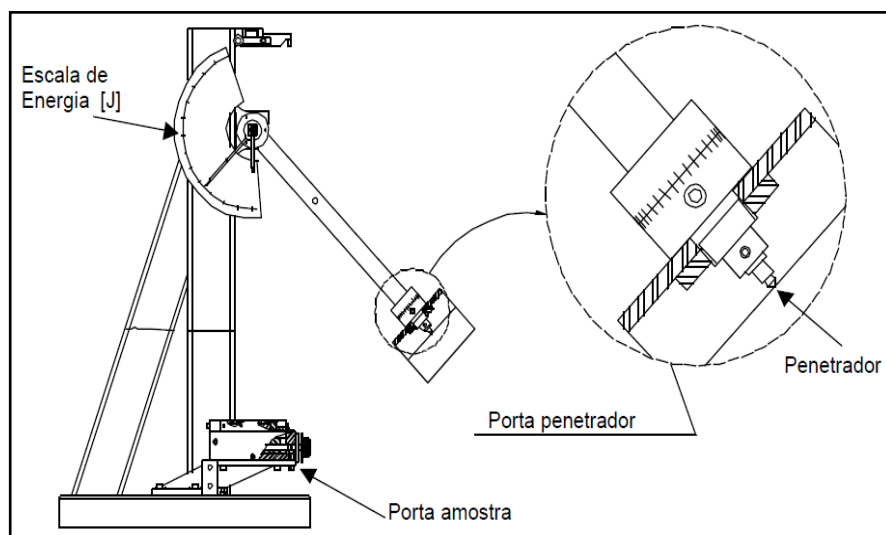


Figura 3.24. Diagrama do esclerômetro pendular mostrando os diversos componentes do instrumento (FRANCO, 1989).

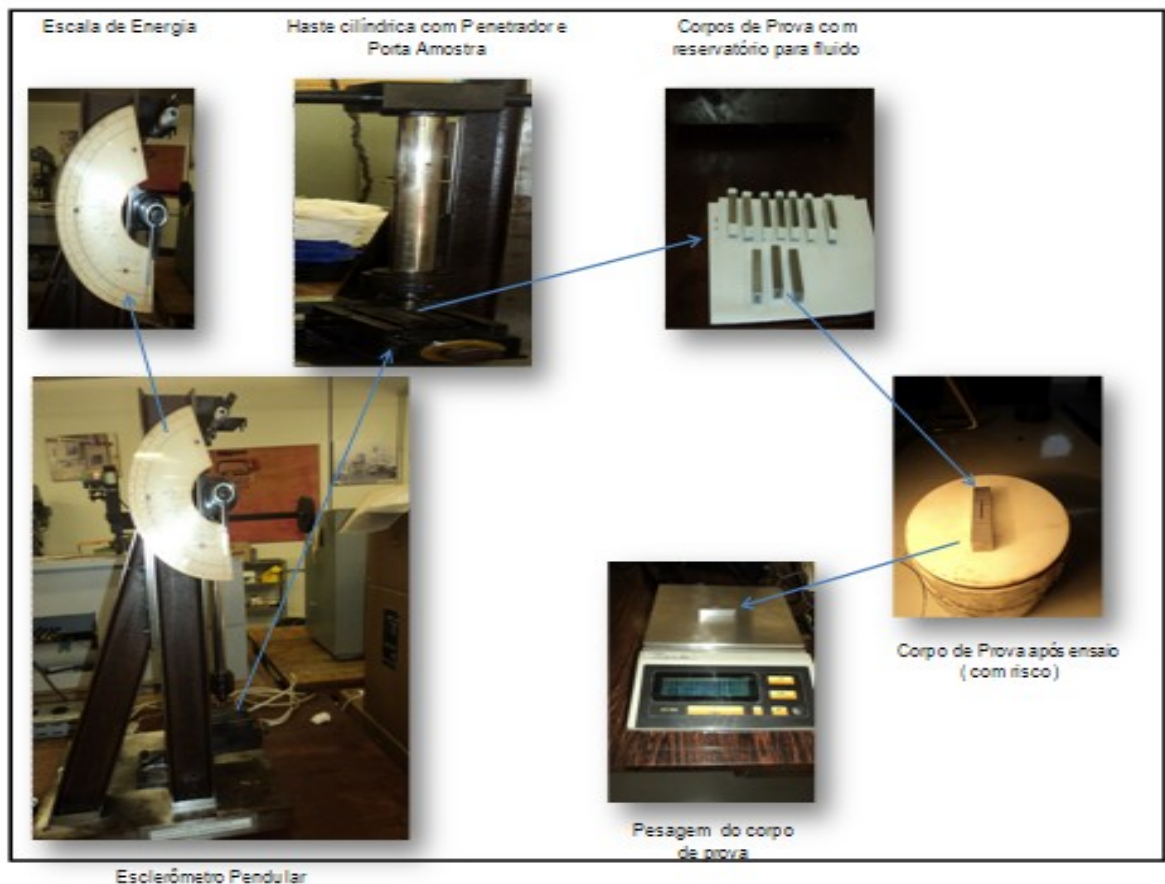


Figura 3.25. Ensaio de verificação de perda de energia específica média (esclerometria pendular).

3.5.3. Metodologia para verificar a capacidade de aderência (molhabilidade) dos fluidos de corte

A molhabilidade é definida como a tendência de um fluido aderir ou espalhar-se preferencialmente sobre uma superfície sólida. Os principais fatores que podem afetar o comportamento de molhabilidade de um sólido por um líquido são: rugosidade e heterogeneidade da superfície do substrato, reações entre líquido e o sólido, atmosfera do ensaio, tempo e a temperatura, (ANEZIRIS e HOMOLA, 2005).

O ângulo de contato (também conhecido como ângulo de molhabilidade) entre uma gota de um líquido com uma tensão superficial conhecida e uma superfície sólida, depende da relação entre as forças adesivas, que fariam a gota se espalhar sobre a superfície e as forças coesivas do líquido que querem contrair a gota a uma esfera com uma superfície mínima. Se a gota repousa sobre uma superfície homogênea perfeitamente nivelada, se

forma um ângulo de contato (θ) de equilíbrio entre o líquido e a superfície sólida. Este ângulo é o mesmo em qualquer ponto da linha de três fases, onde se encontram o sólido, o líquido e a fase de vapor. Por definição tem-se que quando $\theta > 90^\circ$ não há o molhamento do sólido pelo líquido, ou seja, não ocorre o espalhamento do líquido; quando $\theta < 90^\circ$, há o molhamento e o líquido se espalha espontaneamente; quando $\theta \approx 0^\circ$, o líquido se espalha indefinidamente sobre o sólido, ou seja, o molhamento é total, (HADIAN e DREW, 1994). Esses detalhes são ilustrados na Figura 3.25.

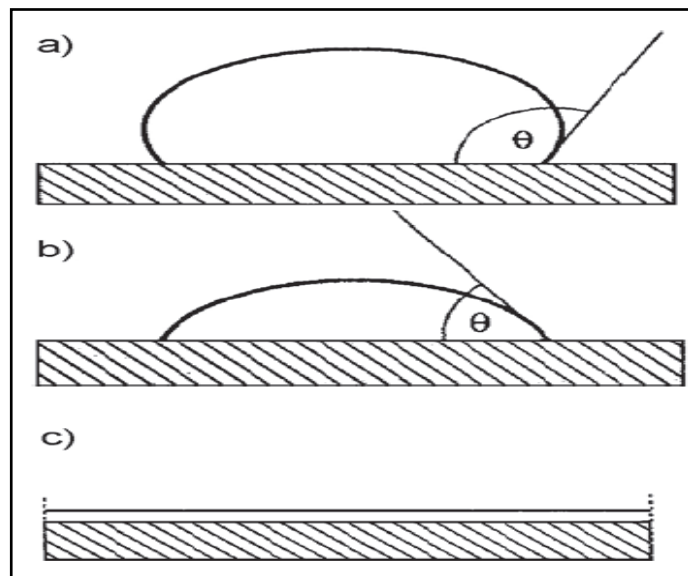


Figura 3.26. Representação do ângulo de contato: a) maior que 90° ; b) menor que 90° ; c) espalhamento total (HADIAN e DREW, 1994).

Os ensaios para determinação da molhabilidade dos óleos usados na pesquisa foram realizados pelo grupo de pesquisas do LACEM - Laboratório de Caracterização e Ensaio de Materiais, da PUC - PR. O procedimento de ensaio de molhabilidade de óleos vegetais sobre substrato de aço é descrito abaixo. Este experimento é mais bem observado quando realizado com diversos substratos. Os substratos devem então ser ajustados aos suportes específicos para este fim e colocados sob uma lâmpada de um projetor de slides ou um retroprojetor. Toda a aparelhagem deve ser montada em algum ambiente escuro ou fracamente iluminado, a fim de que a gota projetada fique o mais nítida possível.

- Substratos sugeridos: Vidro; Teflon; Borracha de silicone; Metal; Acrílico.
- Solventes sugeridos: Água; Glicerol; Isopropanol (para limpeza).
- Dados do substrato: Aço ABNT 1045 Polido.
- Dados de ensaio: Equipamento utilizado: Kruss Easydrop.

- Volume de gota: 10 μ L. Velocidade de medição do ângulo de contato: 2 medidas por segundo. Tempo de medição: 60 s.
- Procedimento de Ensaio: Limpeza do substrato com acetona seguido de imersão em álcool etílico PA (99,5%) por 2 minutos, seguido de secagem com jato de ar quente. Limpeza da seringa com acetona, seguida de secagem com jato de ar quente. Deposição da gota de óleo sobre a superfície do substrato e medição em modo dinâmico do ângulo de contato. Procedimento repetido três vezes para cada óleo utilizado (4 x para o óleo LB 2000).

CAPITULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados de todos os ensaios realizados, inicialmente com os ensaios que não envolveram usinagem (verificação da capacidade lubrificante dos fluidos de corte) e em seguida com os ensaios que envolveram usinagem (força e potência de corte, vibração, acabamento superficial e vida da ferramenta). A apresentação dos dados será na forma de gráficos e tabelas, mostrando também documentação fotográfica de alguns ensaios realizados.

4.1. Testes específicos de determinação da capacidade lubrificante, refrigerante e de molhabilidade dos fluidos de corte (sem usinagem)

4.1.1. Capacidade refrigerante dos fluidos de corte

A Figura 4.1 mostra os resultados do resfriamento do corpo de provas no decorrer do tempo, com aplicação MQF, para os fluidos de corte a base de óleos vegetais.

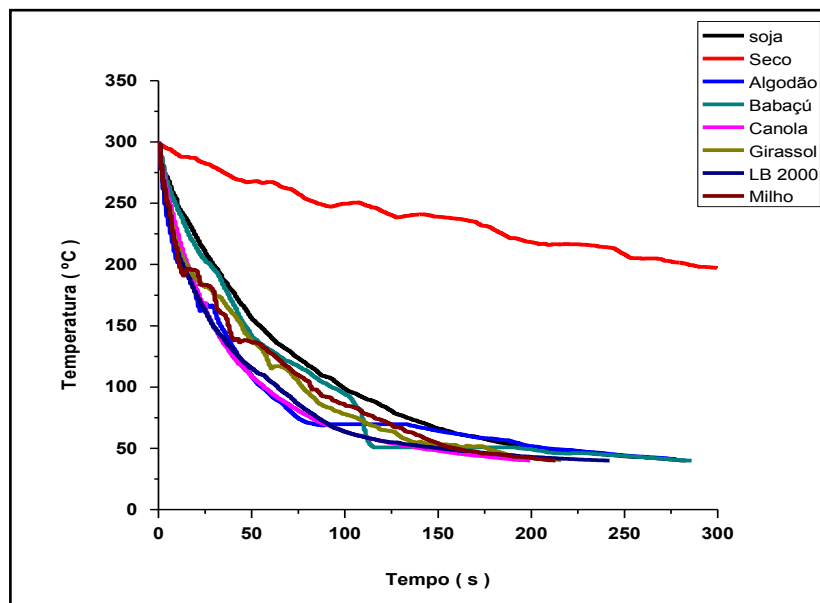


Figura 4.1. Curvas de resfriamento do corpo de prova, com aplicação MQF de fluidos à base de óleos vegetais.

A capacidade de resfriamento mais rápido ocorreu na seguinte ordem: LB 2000, algodão, canola, milho, girassol, soja e babaçú. A Figura 4.2 mostra uma ampliação das curvas de resfriamento sob as diversas condições nos primeiros 70 segundos de teste, que permite uma avaliação mais nítida do comportamento dos fluidos, ainda a altas temperaturas.

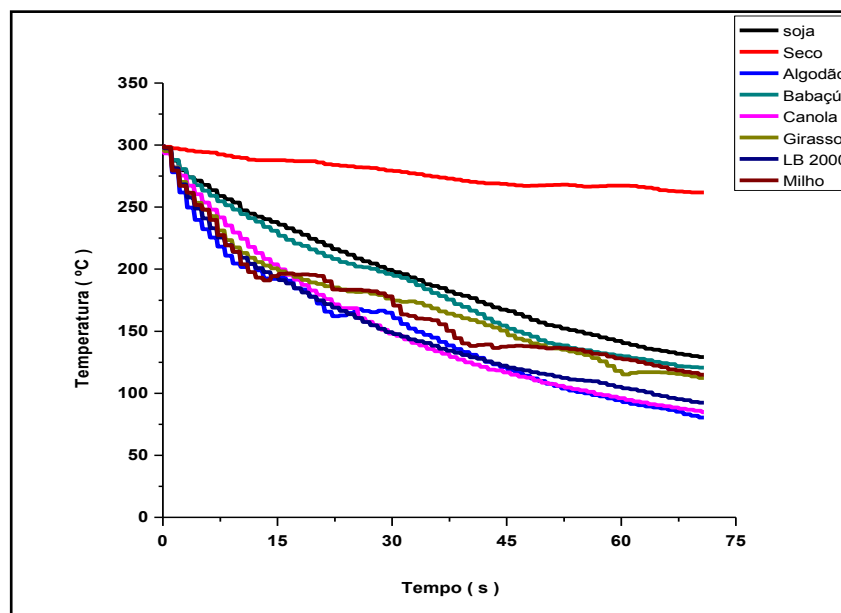


Figura 4.2. Curva de resfriamento nos primeiros 70 segundos de teste.

Observa-se que quando o corpo de prova ainda está com a temperatura elevada, a capacidade de resfriamento sofre uma modificação na sua ordem ficando da seguinte maneira: algodão, canola, LB 2000, milho, girassol, babaçú e soja.

Comparando as duas condições de capacidade de resfriamento total e capacidade de resfriamento em altas temperaturas, podemos destacar que na segunda condição os óleos vegetais LB 2000 (comercial), algodão e canola apresentaram uma grande capacidade de retirada de calor no início, quando a temperatura ainda está acima de 100°C, esta propriedade é importante, pois facilita as operações de usinagem com altas velocidades de corte, nesse caso os óleos citados possuem uma boa capacidade refrigerante. Mas em temperaturas abaixo de 50 °C houve praticamente a mesma capacidade de troca de calor para os demais fluidos.

Com relação à condição a seco, observa-se um tempo de resfriamento muito longo, o que justifica que os óleos aplicados proporcionaram uma significativa redução na taxa de resfriamento durante os ensaios. A Figura 4.3 evidencia este procedimento.

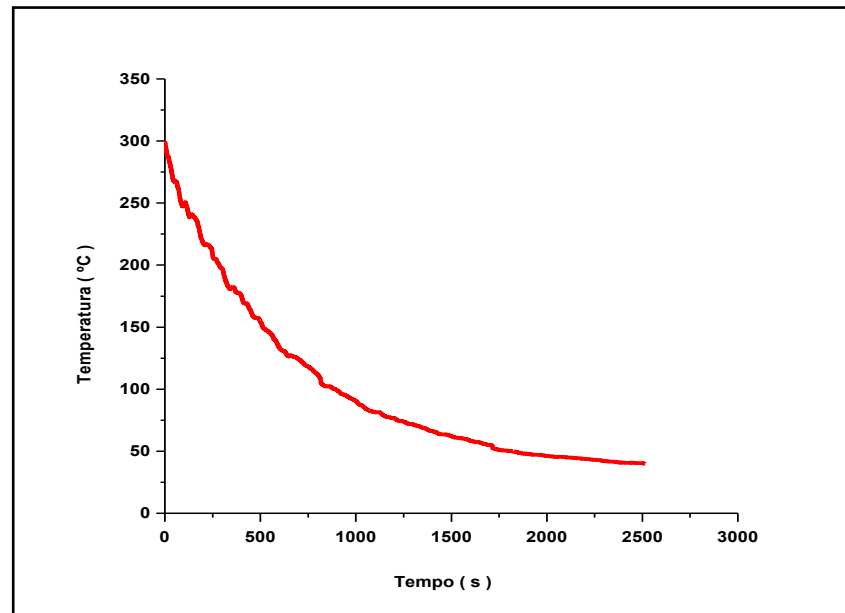


Figura 4.3. Comportamento do resfriamento na condição a seco.

Outra maneira de quantificar a capacidade refrigerante dos fluidos é o cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção, h . Utilizou-se o Método da Capacitância, que se aplica aos casos em que não há variação espacial de temperatura no corpo. O número adimensional de Biot, Bi , deve ser menor que 0,1 e a determinação de h é realizada com um erro em torno de 5% (INCROPERA, 1996). Ele indica a existência ou inexistência de um gradiente de temperatura interno (SISSOM E PITS, 1979). Utilizou-se a Equação 4.1 para determinação do módulo de Bi para cada fluido.

$$\frac{\theta_t}{\theta_i} = e^{-4.Bi.\alpha.t/r^2} \implies Bi = -\frac{r^2.ln(\frac{\theta_t}{\theta_i})}{4.\alpha.t} \quad (4.1)$$

Sendo:

$\theta_t = T_t - T_{\infty}$ = temperatura final do corpo (40 °C ou 313,15 K) - temperatura ambiente (28 °C ou 301,15 K);

$\theta_i = T_i - T_{\infty}$ = temperatura de inicio da aquisição (300 °C ou 573,15 K) - temperatura ambiente (28 °C ou 301,15 K);

Bi = módulo adimensional de Biot;

r = raio interno do corpo de prova, da superfície de medição de temperatura pelo termopar (12,5 mm ou 0,0125 m);

t = tempo total de aquisição (s), (variável para cada ensaio);

α = difusividade térmica ($1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$), para o aço ABNT 1045;

K = condutividade térmica ($40 \text{ W} / \text{m.K}$), para o aço ABNT 1045;

Em função do módulo adimensional de Biot, calcula-se o coeficiente de troca de calor por convecção “ h ”, para cada fluido, através da Equação 4.2.

$$h = \frac{2.K.Bi}{r} \quad (\text{W/m}^2. \text{K}) \quad (4.2)$$

Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 4. 1.

Tabela 4.1. Determinação de Bi e h para cada fluido testado.

Condição	Tempo de Aquisição (s)	$T_t - T_\infty$ (K)	$T_i - T_\infty$ (K)	Bi	h (W / m ² . K)
Seco	2514,80	12	272	0,0032	20,48
Óleo de Soja	283,01	12	272	0,0287	183,68
Óleo de Girassol	278,00	12	272	0,0292	186,88
Óleo de Babaçú	286,01	12	272	0,0284	181,76
Óleo LB 2000	199,41	12	272	0,0407	260,48
Óleo de Canola	216,01	12	272	0,0376	240,64
Óleo de Algodão	213,01	12	272	0,0381	243,84
Óleo de Milho	242,01	12	272	0,0336	215,04

A Tabela mostra que o módulo de Bi foi sempre menor que 0,1 para todas as condições testadas. Isto mostra que o método da capacitância se aplicou a todos os fluidos e o valor de h pôde ser calculado.

A Figura 4. 4 mostra o gráfico dos valores de h em ordem decrescente.

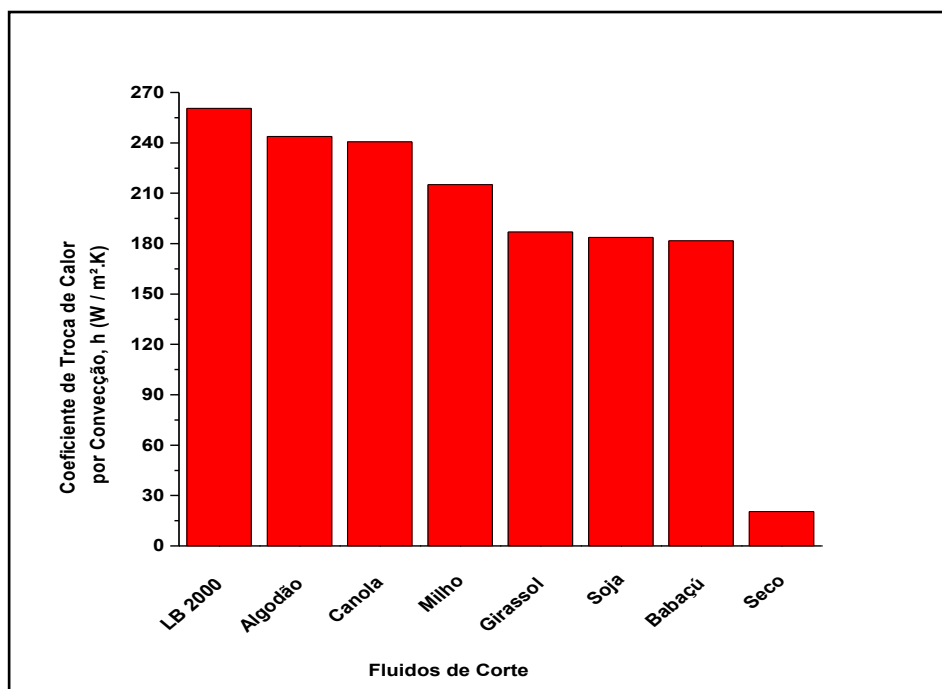


Figura 4.4. Coeficiente de troca de calor por convecção (h) dos fluidos estudados.

A Figura 4.4 mostra que dos óleos comestíveis vegetais que estão em estudo, os óleos a base de algodão e de canola apresentaram a maior capacidade refrigerante (valores bem próximos), enquanto a condição a seco teve o pior desempenho. O óleo a base de milho apresentou valor de h intermediário, enquanto os óleos a base de girassol, soja e babaçú apresentaram valores de h praticamente similares. De um modo geral podemos analisar que a diferença de h entre os óleos ficou em torno de 30%, o que nos leva a considerar que o cálculo de h , por meio do Método da Capacitância, permitiu estabelecer fisicamente a capacidade refrigerante dos fluidos. As curvas obtidas pelos ensaios de refrigeração, mostradas nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, apresentam comportamento similar relativo dos fluidos e podem ser utilizadas para estas análises.

Podemos analisar também os resultados em função das propriedades lubrificantes dos óleos aplicados, nesse caso a viscosidade. A viscosidade deve ser suficientemente baixa para permitir uma boa circulação do fluido e suficientemente alta de modo a permitir uma

boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta. Para que haja uma boa lubrificação, deve-se formar um filme de fluido entre as partes em contato. No caso dos óleos utilizados nesta pesquisa, observou-se, conforme Tab. 2.13 apresentada anteriormente que todos possuem viscosidades baixas, o que proporcionou uma boa capacidade refrigerante durante os ensaios realizados.

4.1.2. Capacidade lubrificante dos fluidos de corte

A Figura 4.5 mostra o comportamento da energia específica média consumida nos riscos, de amostras de aço ABNT 1045, para uma mesma perda de massa equivalente a 20 mg imersas em 3 mm de camada de fluidos de corte a base de óleos vegetais e de fluido emulsionável.

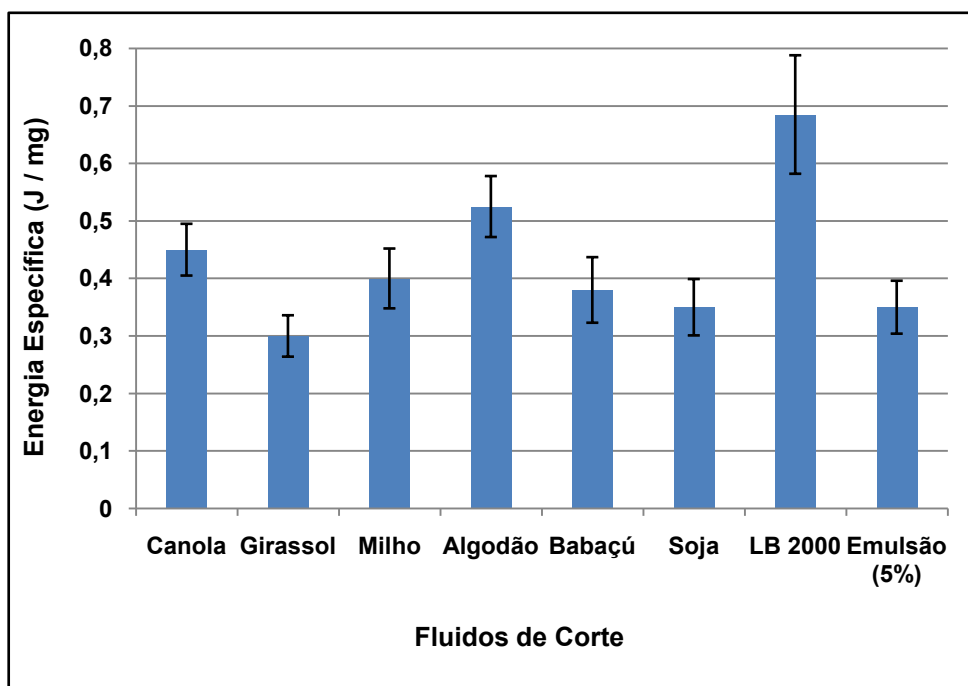


Figura 4.5. Energia específica média consumida em amostras de aço ABNT 1045 submersas em fluidos de corte.

Os fluidos de base vegetal com maior capacidade de retirada de calor, de acordo com o coeficiente de troca de calor por convecção (h), no caso, LB 2000, algodão e canola, nesta ordem foram os que apresentaram maiores energias específicas. Os que possuíram uma maior capacidade de lubrificação apresentaram uma menor energia. Durante o riscamento, uma parcela considerável da energia necessária para riscar é convertida em energia

térmica. Isto ocorre em uma região extremamente localizada, o que sugere uma elevação repentina da temperatura. Isto promove o amolecimento do material da amostra, facilitando o cisalhamento. Quando o fluido tem a maior capacidade de refrigerar, ele dissipa mais calor e reduz o amolecimento do material, gastando-se mais energia para riscar o corpo de provas.

Os valores do ponto de fulgor encontrados nos óleos vegetais utilizados neste estudo estão entre 300 °C e 329 °C (conforme Tabela 2.13). Nota-se que são valores elevados inclusive se compararmos com óleos minerais e sintéticos; isso evidencia, conforme demonstrado nos ensaios, a boa aplicabilidade dos mesmos em altas temperaturas.

A superior propriedade lubrificante dos óleos vegetais, devido a sua alta lubricidade, se comparada com os óleos minerais, é resultante de sua composição molecular e estrutura química. Existem variedades de compostos vegetais que apresentam comportamentos polares quando transformados em compostos de fluidos. Nestas condições, os óleos vegetais possibilitam uma lubrificação superior à dos minerais, pois, elas se associam à superfície metálica das peças, formando uma camada lubrificante capaz de suportar grandes tensões superficiais, facilitando a usinagem e prolongando a vida útil da ferramenta; esse resultado ficou evidenciado nos ensaios realizados.

O fluido emulsionável apresenta propriedades lubrificantes e refrigerantes intermediárias. Com isto, os efeitos de amolecimento e redução do atrito são também intermediários. Isto o justifica ter apresentado um consumo médio de energia nos riscamentos, abaixo da maioria dos fluidos aplicados.

4.1.3. Capacidade de aderência (molhabilidade) dos fluidos de corte

A Fig. 4.6 mostra a variação dinâmica dos ângulos de contato da gota durante 60 segundos, para cada óleo testado. Já a Fig. 4.7 mostra o ângulo de contato da gota no tempo de 30 segundos de ensaio. Não foi realizado o ensaio com o óleo de coco babaçú, pois o mesmo polimerizou talvez devido à baixa temperatura no sul do país (Curitiba - PR).

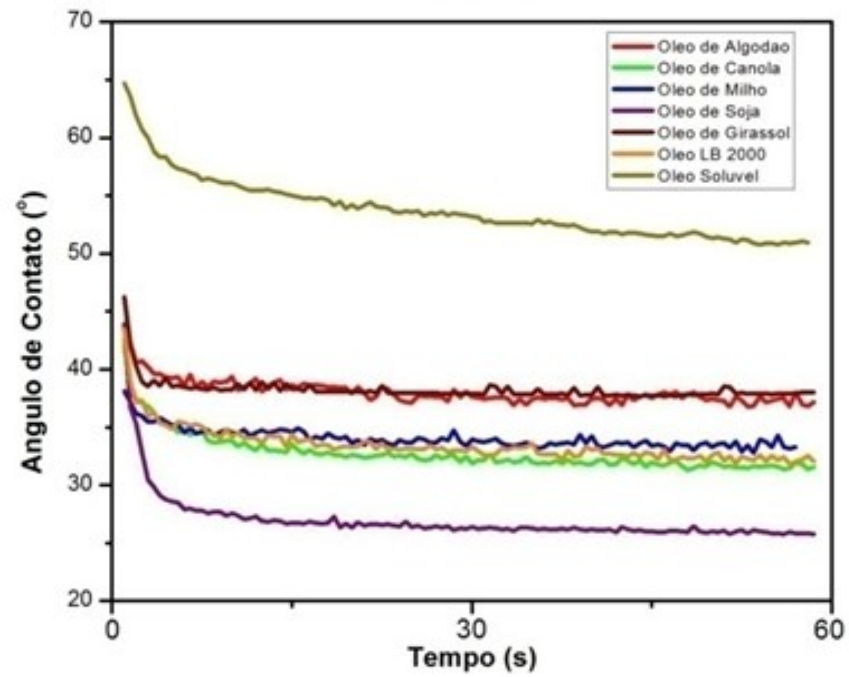


Figura 4.6. Variação do ângulo de contato dinâmico no decorrer do tempo.

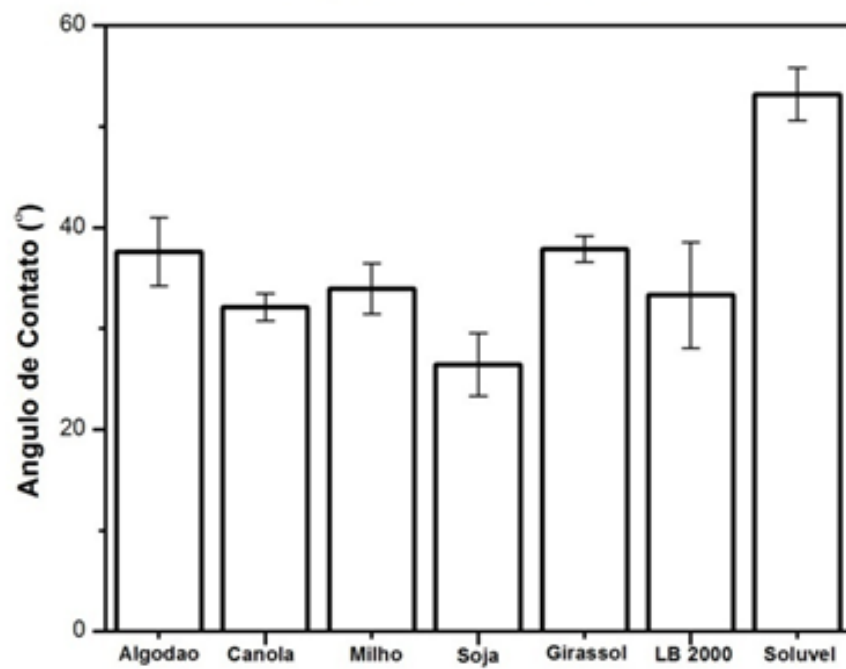


Figura 4.7. Ângulo de contato estático 30 segundos após o contato inicial da gota na superfície.

Um fluido é considerado molhante (tende a molhar a superfície) quando $0^\circ < \theta < 90^\circ$ e não-molhante quando $90^\circ < \theta < 180^\circ$. O ângulo $\theta < 90^\circ$ indica que o líquido molhante é água, $\theta > 90^\circ$ indica que o líquido molhante é o óleo, e $\theta = 90^\circ$ indica molhabilidade neutra. Observa-se que nos resultados gráficos apresentados, tanto o ângulo de contato dinâmico quanto o ângulo de contato estático, foram menores que 90° , indicando que em todos os fluidos de corte testados o líquido molhante foi à água e todos possuem boa aderência à superfície, ou seja, boa capacidade lubrificante.

Quanto menor o ângulo de contato, maior a molhabilidade. A redução do ângulo de contato indica que a superfície é mais hidrofílica, esta parte da estrutura tem afinidade com a água, ou seja, é capaz de interagir com moléculas de água. Para interagir com as moléculas de água, esta parte da estrutura deve ser polar, ou seja, possuir alto momento dipolar (diferença de polaridade entre as extremidades da parte da estrutura), que é o caso dos óleos vegetais aplicados nesta pesquisa. Observa-se também que quanto menor a viscosidade do óleo, menor a molhabilidade da superfície ao óleo, maior pressão capilar e maior permeabilidade relativa do óleo. Numa escala decrescente de capacidade de molhabilidade, destacamos o comportamento dos fluidos: soja, canola, LB 2000, milho, algodão, girassol e solúvel.

4.2. Desempenhos dos fluidos de corte de base vegetal no fresamento frontal

Considerando os resultados obtidos durante os experimentos, os mesmos mostram que dependendo das condições de usinagem adotadas durante o processo de fabricação por fresamento frontal, há uma diferença significativa entre eles. Variando-se a velocidade de corte (v_c), o avanço (f_z), a profundidade de corte (a_p) e os fluidos de corte aplicados na forma de mínima quantidade de fluido (MQF), nas vazões de 10, 50, 100 e 200 ml/h, em abundância (jorro) e na condição a seco, observou-se através dos parâmetros de usinabilidade (forças de usinagem, potência de corte, vibração e acabamento superficial), uma influência considerável dos fluidos aplicados. As condições de corte são as mesmas apresentadas na Tabela 3.1.

Dentro das condições de usinagem, devido à crescente velocidade de corte que as máquinas operam, e conseqüentemente com maior quantidade de calor gerado, o fluido de corte e a forma de aplicação no processo passam a ter uma maior relevância.

Há disponível no mercado uma grande diversidade de óleos e fluidos de corte para os diferentes processos de usinagem, os quais se desejam usá-los. Diversos fatores influem na

escolha do melhor fluido, como viscosidade, características técnica, custo, etc., e mesmo após a escolha do mesmo, ainda existem outras considerações que devem ser feitas para o melhor aproveitamento desse fluido. Entre eles destacam-se a geometria do bocal pelo qual o fluido será introduzido na operação, a intensidade de pressão e a vazão na saída do bocal, qual a melhor posição que se deve colocar o bocal, entre outras, sendo todas de substancial importância para a melhoria da qualidade final da peça.

Foram grandes quantidades de resultados obtidos durante esta fase para serem analisados e discutidos. Utilizou-se, nas oito condições de corte geradas pelo planejamento fatorial 2^4 , seis óleos de base vegetal comestíveis e um óleo de base vegetal comercial, um óleo mineral emulsionável na concentração de 5% e a condição a seco.

Optou-se em verificar inicialmente qual das vazões utilizadas no sistema MQF proporcionou uma maior redução nos valores da força de corte (F_x), que é a principal componente da força de usinagem. Para efeito de comparação utilizou-se os resultados obtidos nos ensaios com o óleo de base vegetal LB 2000, comercial, por se tratar de um fluido de corte próprio para ser usado em sistemas de microlubrificação. Uma análise de variância (Anova, fator único) foi utilizada primeiramente para verificar se as variações das vazões dos fluidos de corte aplicadas influenciaram nos resultados das forças de corte. Caso positivo, verificar-se-á a vazão considerada ideal para os ensaios, utilizando inferência estatística através de testes de hipóteses, no caso desta pesquisa o teste “t de student” para dados pareados.

Comparando os resultados obtidos das forças de corte nas diversas vazões (10, 50, 100 e 200 ml/h), com a condição a seco (vazão 0), utilizando uma análise de variância (Anova, fator único) no software Excel 2010, conforme Tabela 4.2, nota-se que o valor da probabilidade do teste (valor $p = 1,3 \times 10^{-39}$) < (0,05 = α), que é o nível de significância estabelecido previamente, indicando que a hipótese inicial de variâncias iguais para esses casos foi rejeitada, ou seja, o fator variação da vazão causa significativa variação na resposta força máxima de usinagem.

Tabela 4.2. Verificação da influencia das vazões na força de corte através da análise de variância (Anova, fator único).

Anova: Fator Único (Resumo)						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Vazões (ml/h)	5,00	360,00	72,00	6670,00		
Forças de Corte (N) (LB 2000 / Seco)	5,00	2204,00	440,80	732,52		
	5,00	1833,60	366,72	52,59		
	5,00	4412,10	882,42	389,86		
	5,00	3490,60	698,12	32,73		
	5,00	4088,00	817,60	19,59		
	5,00	3474,80	694,96	111,18		
	5,00	9070,80	1814,16	3989,13		
	5,00	6919,30	1383,86	1076,65		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor P	F crítico
Entre grupos	11222866	8	1402858	965,69	1,3E ⁻³⁹	2,21
Dentro dos grupos	52297	36	1453			
Total	11275163	44				

Em função da variação de vazão ter sido considerada significativa nos resultados das forças de corte (F_x), identificou-se qual delas, pode ser considerada como a vazão ideal a ser utilizada como padrão em todos os testes de usinagem relacionados no planejamento experimental desta pesquisa. Para tal fim utilizou-se o software Excel 2010, uma inferência estatística através do teste de hipótese (teste t de student) para dados pareados, comparando o resultado médio das forças de corte em cada vazão com a condição a seco (vazão zero). Continuou-se a utilizar os resultados do óleo LB 2000, conforme justificativa já apresentada. A Tab. 4.3 evidencia este procedimento.

Tabela 4.3. Verificação da melhor das vazões através do teste de hipótese t de student (teste t pareado, $\alpha = 0,05$).

Vazões (ml/h)	Forças de Corte (LB 2000 / SECO) (N)								Valor p
10	465	370,0	890,0	693,4	815,8	700,7	1810	1400,0	0,117
50	407,8	359,0	876,5	691,0	810,6	678,7	1780	1340,3	0,020
100	434,6	371,0	888,8	700,7	820,3	695,0	1810	1398,0	0,083
200	422,8	359,0	850,0	698,0	820,3	693,4	1753	1360,0	0,046
0	471,8	374,6	904,8	704,8	821,0	707,0	1919	1421,0	

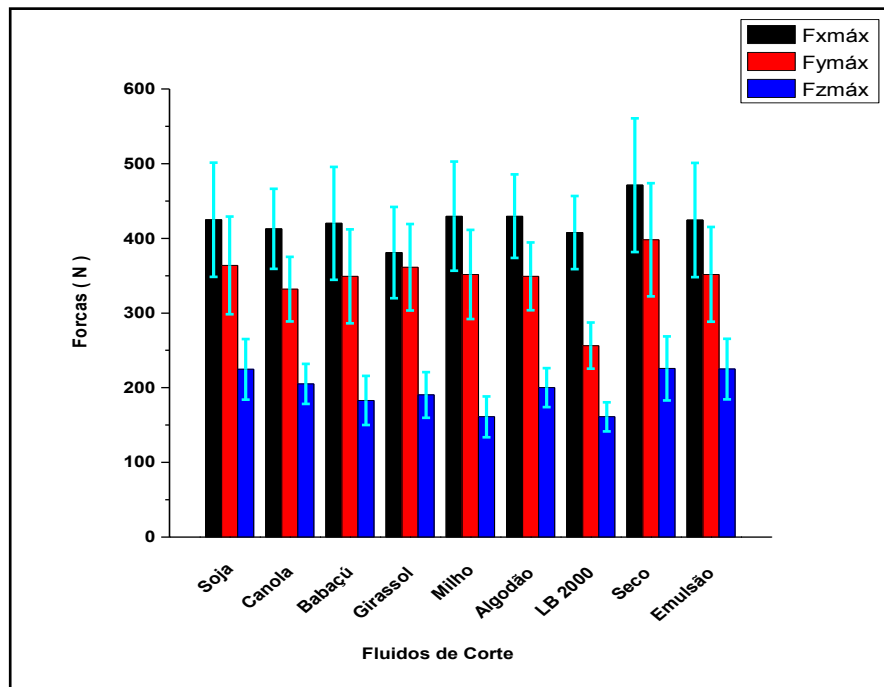
Como resultado desta comparação, observou-se que nas vazões de 50 ml/h e 200 ml/h o valor da probabilidade do teste, “valor - p” é igual a 0,020 e 0,046 respectivamente, sendo ambos menores que o nível de significância ($\alpha = 0,05$) estabelecido previamente, o que mostra que as mesmas possuem uma influencia significativa sobre as forças de corte.

Adotando os critérios econômico (custo do fluido de corte), ambiental (quantidade de névoa de fluido gerada no processo) e ocupacional (saúde do operador), optou-se pela vazão de 50 ml/h, como sendo a vazão ideal para os ensaios com utilização da técnica de mínima quantidade de fluido (MQF).

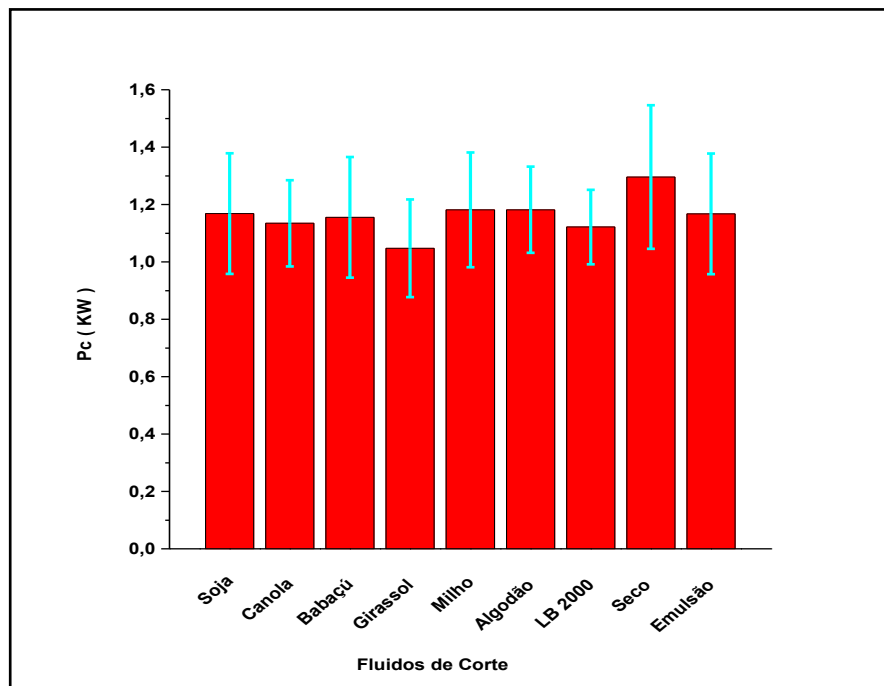
4.2.1. Desempenho dos fluidos de corte de base vegetal em relação às forças de usinagem e potência de corte

Nesta etapa são apresentados os resultados obtidos e as discussões sobre a relação entre estratégias de usinagem ou parâmetros de corte, força de usinagem e potência de corte. Conforme explanado anteriormente, os óleos de base vegetal foram aplicados pela técnica MQF nas vazões de 10, 50, 100 e 200 ml/h, mas serão apresentados apenas os resultados na vazão considerada ideal que foi a de 50 ml/h, os demais resultados nas outras vazões foram colocados no apêndice A deste trabalho, a título de informação. Serão apresentadas as médias dos valores máximos RMS relativos às forças de usinagem, agrupadas por condição em função dos parâmetros de corte, ou seja, a força de corte ($F_{x\max}$), a força de avanço ($F_{y\max}$) e a força passiva ($F_{z\max}$). Acredita-se que a análise das forças seja mais recomendada para se estabelecer o desempenho dos óleos vegetais aplicados como fluidos de corte. No caso da potência, optou-se em obtê-la em função da força de corte ($F_{x\max}$), nesse caso será apresentada graficamente a potência de corte para todas as condições de usinagem estabelecidas. As Figs. 4.8 a 4.15, mostram, a influência da velocidade de corte (v_c), do avanço (f_z) e da profundidade de corte (a_p) sobre as forças de usinagem (F_u) e sobre as potências de corte (P_c), para o corte a seco, com abundância de fluido (emulsão / jorro) e com aplicação MQF na vazão de 50 ml/h dos óleos de base vegetal.

- **Condição de usinagem 1: v_c : 165 m/min; f_z : 0,15 mm/rot.; a_p : 1 mm**



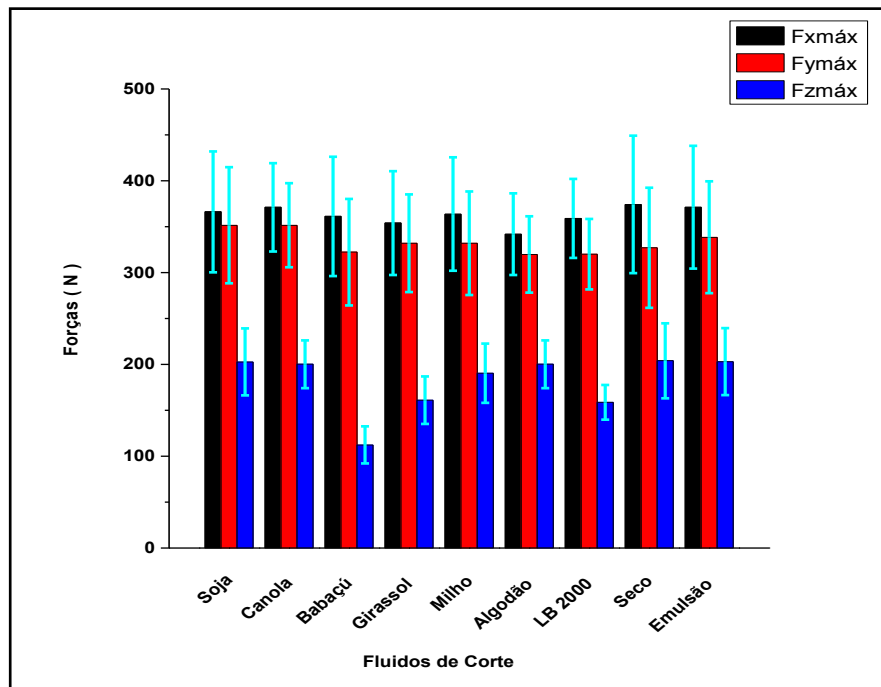
(a)



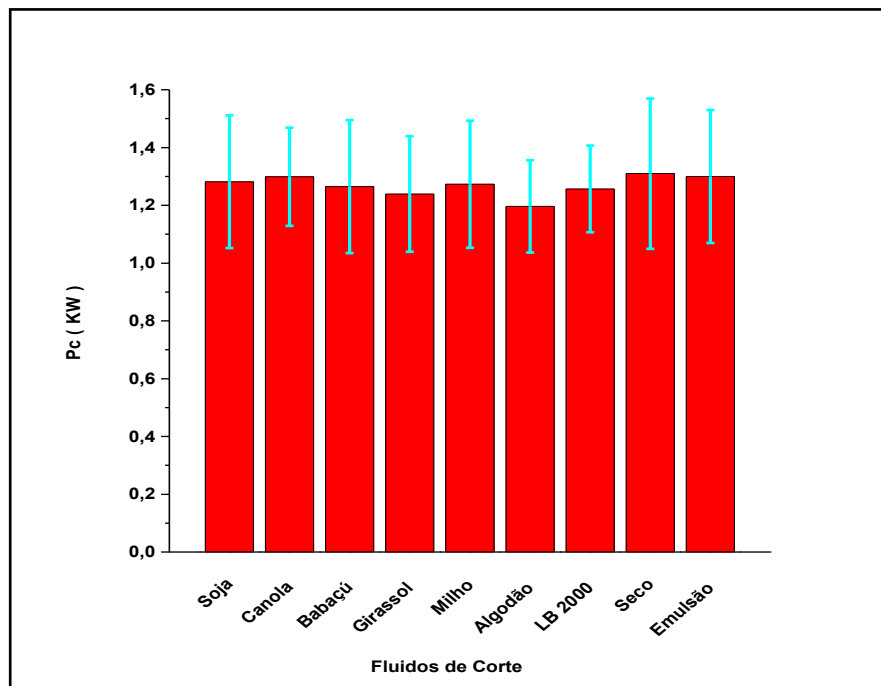
(b)

Figura 4.8. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 1.

- **Condição de usinagem 2: v_c : 210 m/min; f_z : 0,15 mm/rot.; a_p : 1 mm**



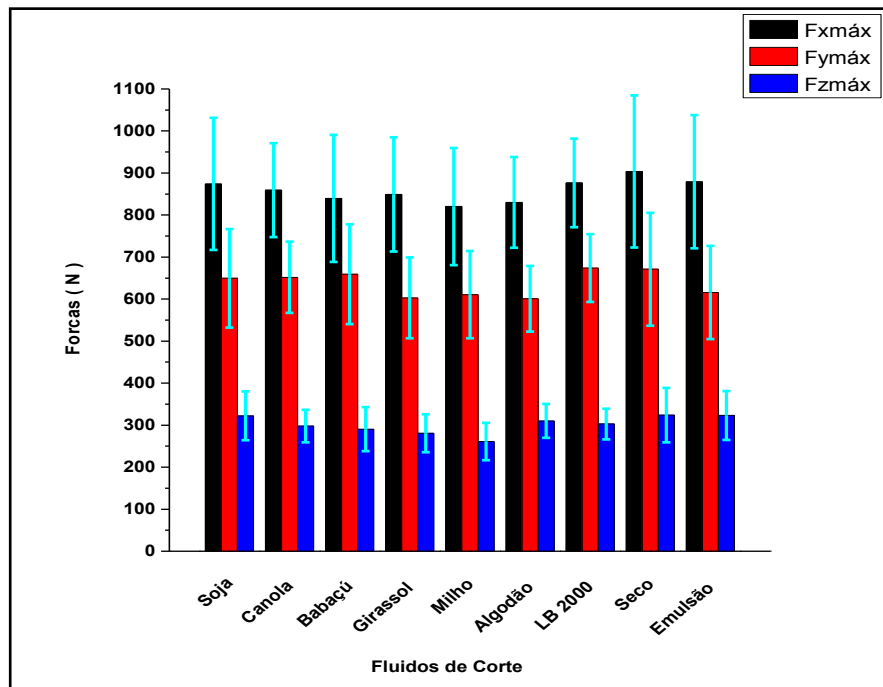
(a)



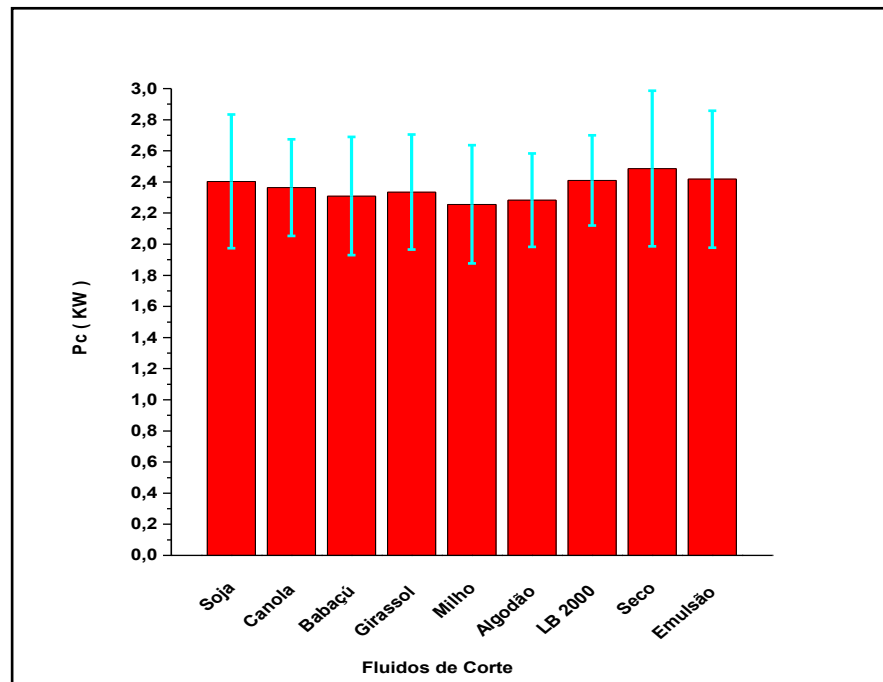
(b)

Figura 4.9. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 2.

- **Condição de usinagem 3: v_c : 165 m/min; f_z : 0,30 mm/rot.; ap: 1 mm**



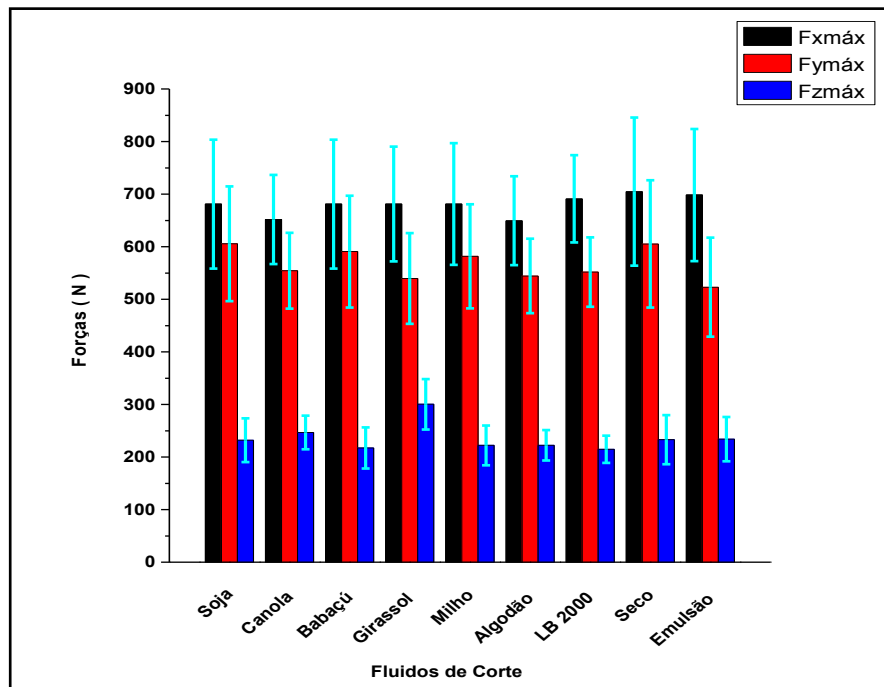
(a)



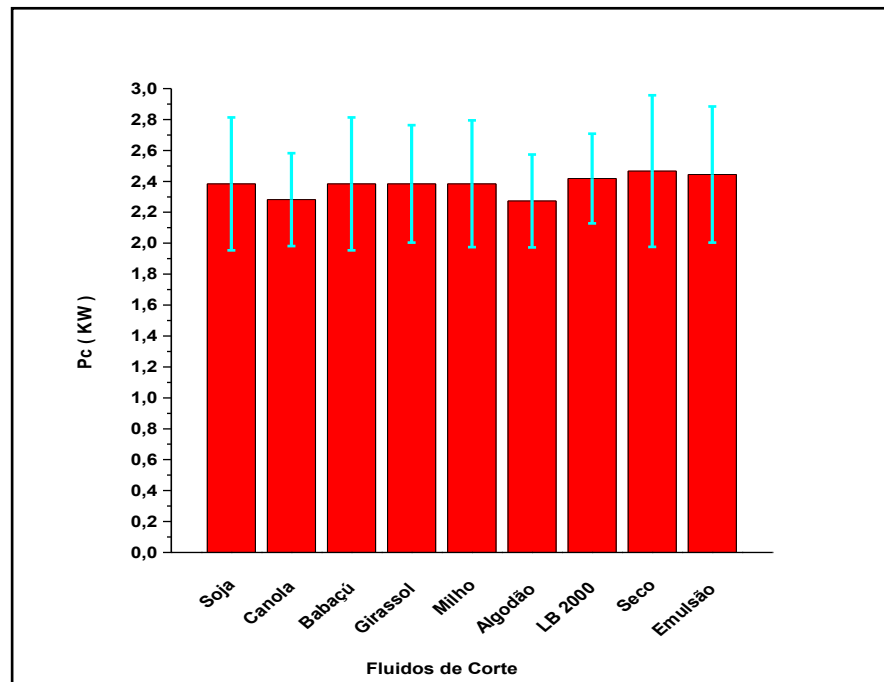
(b)

Figura 4.10. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 3.

- **Condição de usinagem 4: v_c : 210 m/min; f_z : 0,30 mm/rot.; ap: 1 mm**



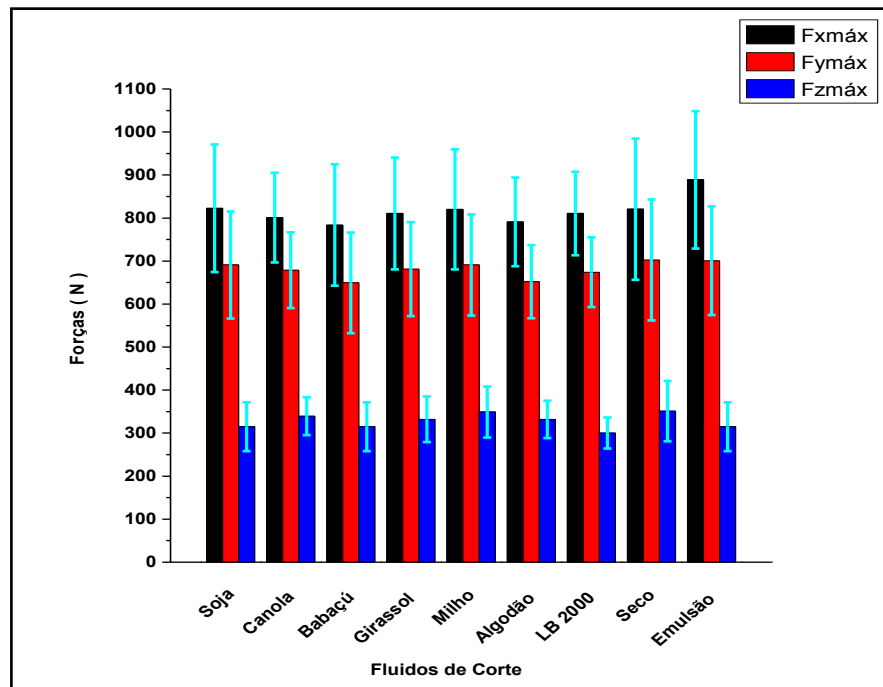
(a)



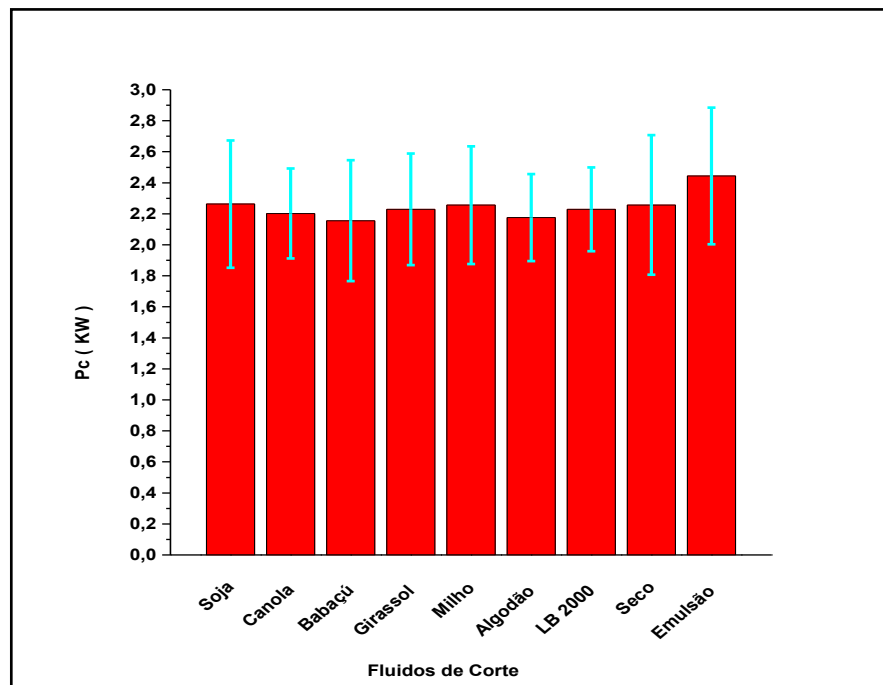
(b)

Figura 4.11. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 4.

- **Condição de usinagem 5: v_c : 165 m/min; f_z : 0,15 mm/rot.; a_p : 2 mm**



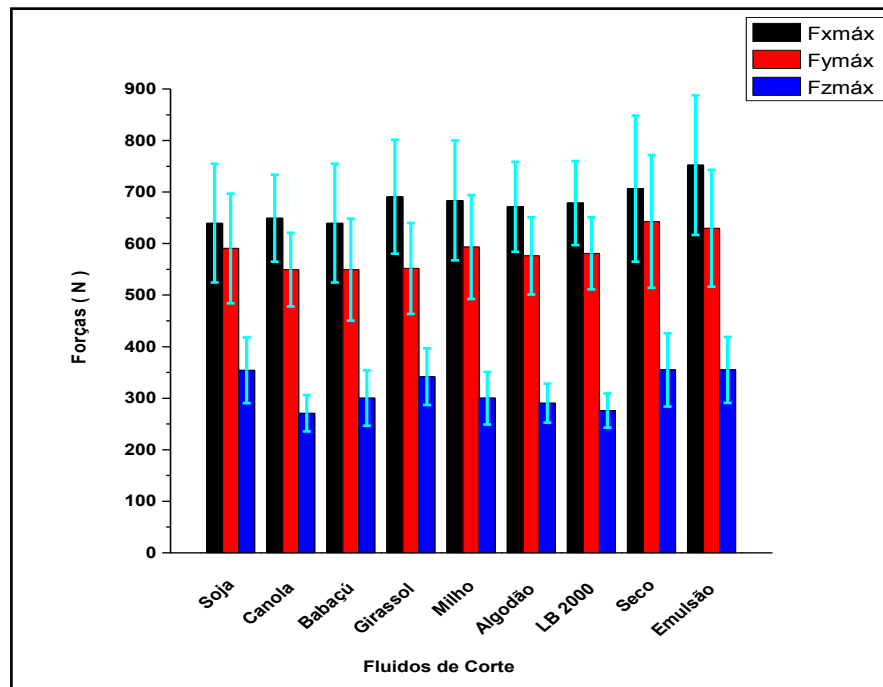
(a)



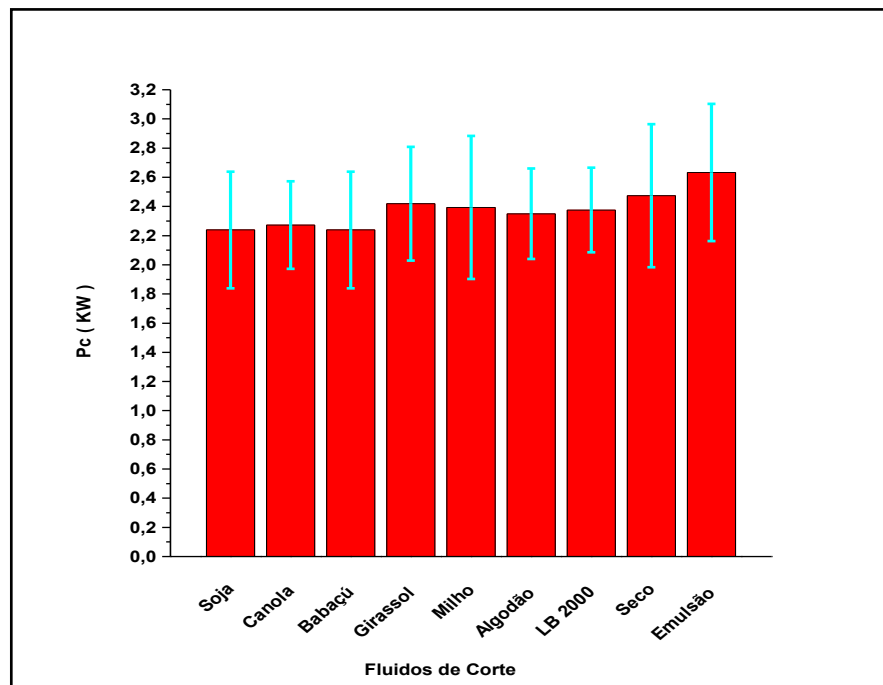
(b)

Figura 4.12. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 5.

- **Condição de usinagem 6: v_c : 210 m/min; f_z : 0,15 mm/rot.; ap: 2 mm**



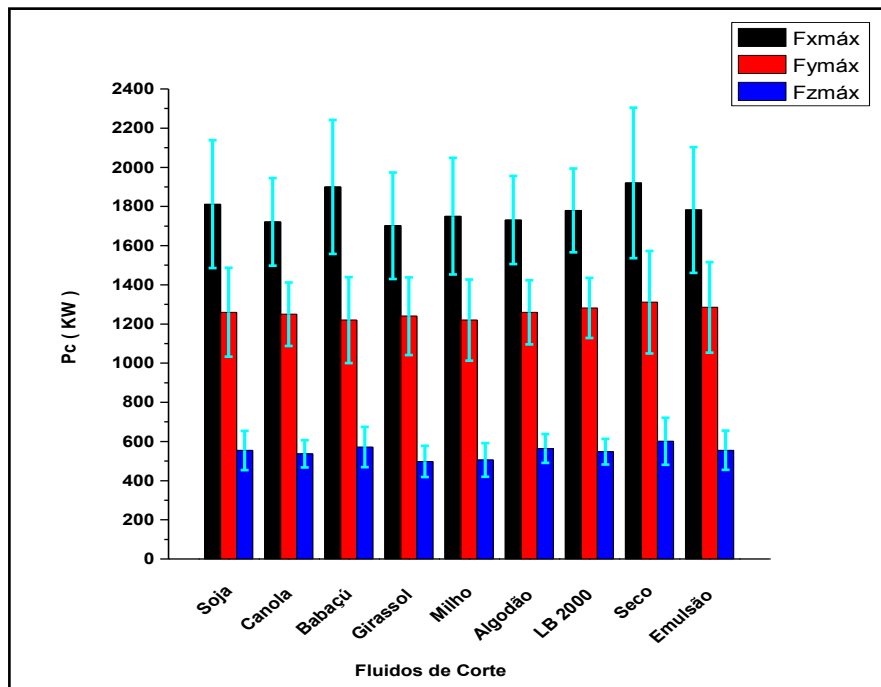
(a)



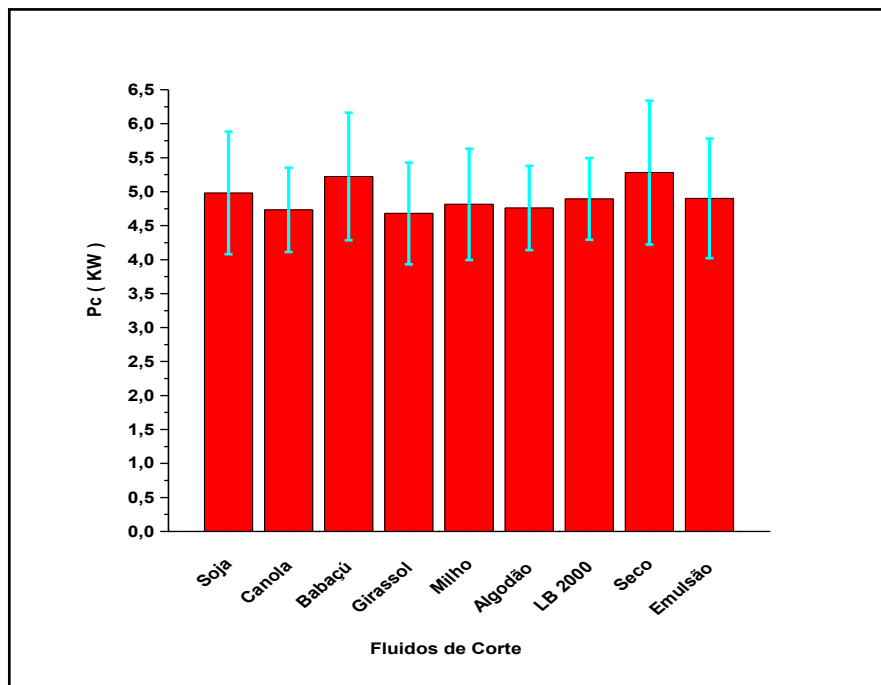
(b)

Figura 4.13. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 6.

➤ **Condição de usinagem 7: v_c : 165 m/min; f_z : 0,30 mm/rot.; a_p : 2 mm**



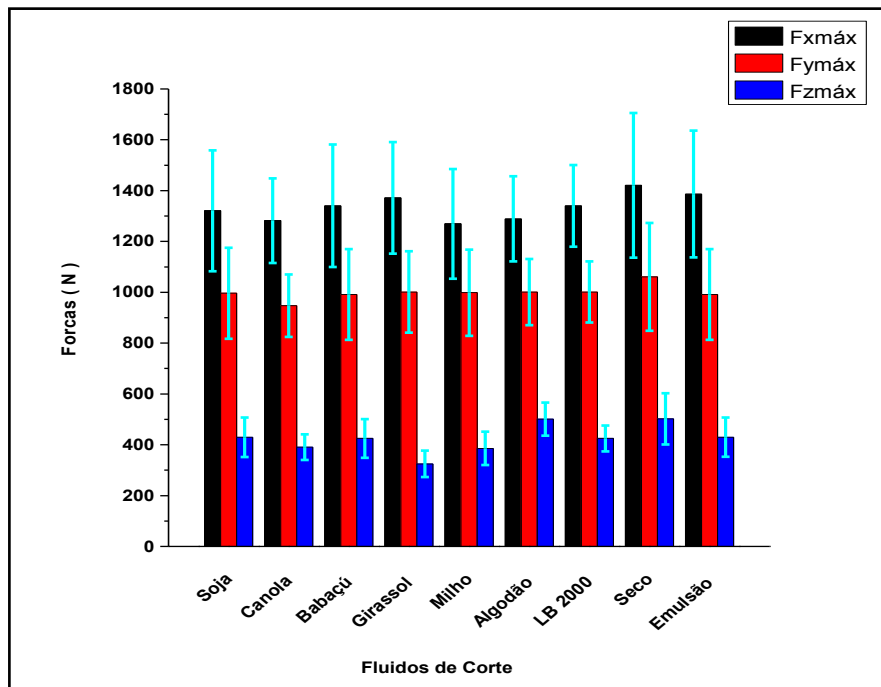
(a)



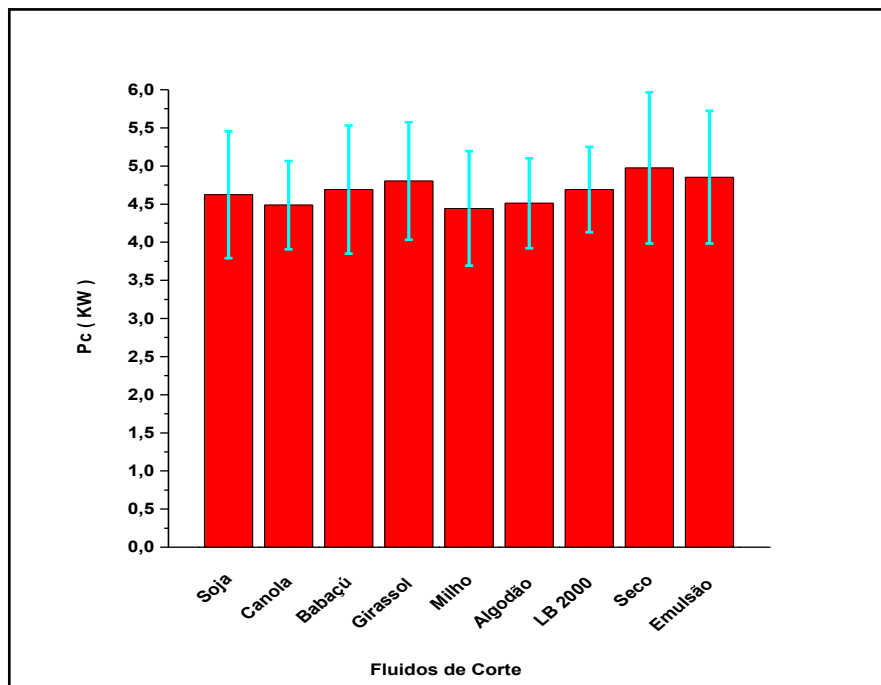
(b)

Figura 4.14. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 7.

- **Condição de usinagem 8: v_c : 210 m/min; f_z : 0,30 mm/rot.; a_p : 2 mm**



(a)



(b)

Figura 4.15. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Forças de usinagem; b) Potência de corte, na condição de usinagem 8.

Analisando os resultados apresentados nos gráficos das Figs. 4.8 a 4.15 com suas respectivas dispersões, observa-se que o aumento da velocidade de corte reduz os valores das forças de usinagem e aumenta os valores da potência de corte independentemente do fluido utilizado e isto se deve ao aumento da geração de calor, da elevação da temperatura na interface cavaco-ferramenta e consequente amolecimento do material da peça, facilitando o cisalhamento e a formação do cavaco. Já os aumentos no avanço e na profundidade de corte têm efeito contrário, ou seja, causam aumentos nos valores dessas variáveis de saída. Isto porque há um aumento proporcional direto nas áreas de cisalhamento. O fluido LB 2000 apresentou pouca variação de valores em relação à mudança nas condições de corte para as forças de usinagem (F_u) e potência de corte (P_c), enquanto na condição a seco houve aumento nos valores dessas variáveis, em comparação a aplicação dos fluidos.

Em função dos resultados das forças de usinagem e potências de corte apresentados, pretende-se identificar qual dos óleos vegetais comestíveis estudados teve um melhor desempenho nesta etapa. Uma forma de se avaliar qual desses fluidos realmente influenciou na força máxima de usinagem e na potência de corte é através do uso da inferência estatística com utilização de testes de hipóteses. No caso desta pesquisa utilizamos o teste t de student para dados pareados (comparação entre $F_{xmáx}$ obtidas pela aplicação dos óleos vegetais comestíveis, com $F_{xmáx}$ obtidas tanto da condição a seco quanto da aplicação do fluido LB 2000) considerando duas hipóteses, uma sendo nula, onde não existe diferença significativa entre as médias das forças de usinagem e da potência de corte independentemente do óleo de base vegetal aplicado como fluido de corte e outra considerada não nula que se contrapõe à primeira. Para definir se a hipótese nula deve ser rejeitada ou não, adotamos uma confiabilidade de 95%, ou equivalentemente um nível de significância de 5%. Se a probabilidade do teste (p-valor) for menor que esse nível de significância, a hipótese nula é rejeitada. Caso contrário, a hipótese nula não será rejeitada. Utilizou-se nos cálculos o software STATISTICA 7.0. Este procedimento é evidenciado através da Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Análise estatística entre óleos vegetais no critério força de corte utilizando teste de hipótese t de student pareado ao nível de significância de 5 %, ($\alpha = 0,05$).

ÓLEO VEGETAL COMESTÍVEL	COMPARAÇÃO ($\alpha = 0,05$)	
	A SECO (valor p)	ÓLEO LB 2000 (valor p)
SOJA	0,85	0,99
CANOLA	0,77	0,92
BABAÇÚ	0,86	0,99
GIRASSOL	0,81	0,96
MILHO	0,80	0,95
ALGODÃO	0,77	0,91

De acordo com os resultados obtidos nos testes, observa-se que as médias das forças de usinagem e potências de corte de todos os óleos vegetais aplicados como fluidos de corte não mostraram diferenças significativas quando comparadas tanto com a condição a seco quanto com o fluido LB 2000 (comercial), em todos os casos o valor da estatística t pareada foi maior que o nível de significância alfa ($\text{valor } p > \alpha$), conforme indicado na Tabela 4.4. Igualmente, quando comparamos o desempenho de todos, observa-se que os óleos a base de canola e a base de algodão levam uma pequena vantagem em relação aos demais, confirmando esse comportamento, mostrou-se também esse comparativo das médias e dos desvios padrões entre os mesmos com o óleo LB 2000, conforme Figs. 4.16 e 4.17, respectivamente. Houve uma pequena redução em torno de 3% nos valores médios das forças de corte quando da utilização dos referidos óleos vegetais comestíveis. Acredita-se que o bom desempenho desses óleos se deu em função de suas capacidades de troca de calor por convecção, facilitando a refrigeração do processo, da viscosidade adequada, facilitando a aderência na superfície e conseqüentemente à capacidade de lubrificação. Portanto adotando-se os critérios de forças de usinagem e potências de corte ao nível de confiança de 95% optamos em utilizar esse dois óleos vegetais na 2ª etapa dos experimentos (testes de vida da ferramenta de corte).

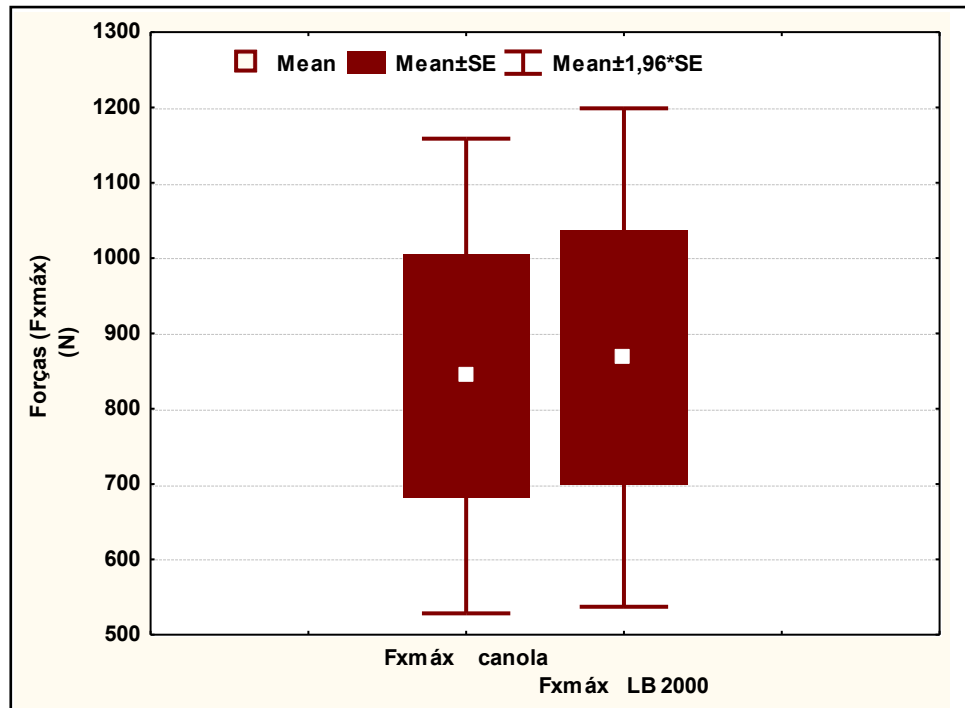


Figura 4.16. Gráfico Comparativo da média de $F_{xmáx}$ entre o óleo vegetal comestível a base de Canola e o óleo vegetal comercial LB 2000.

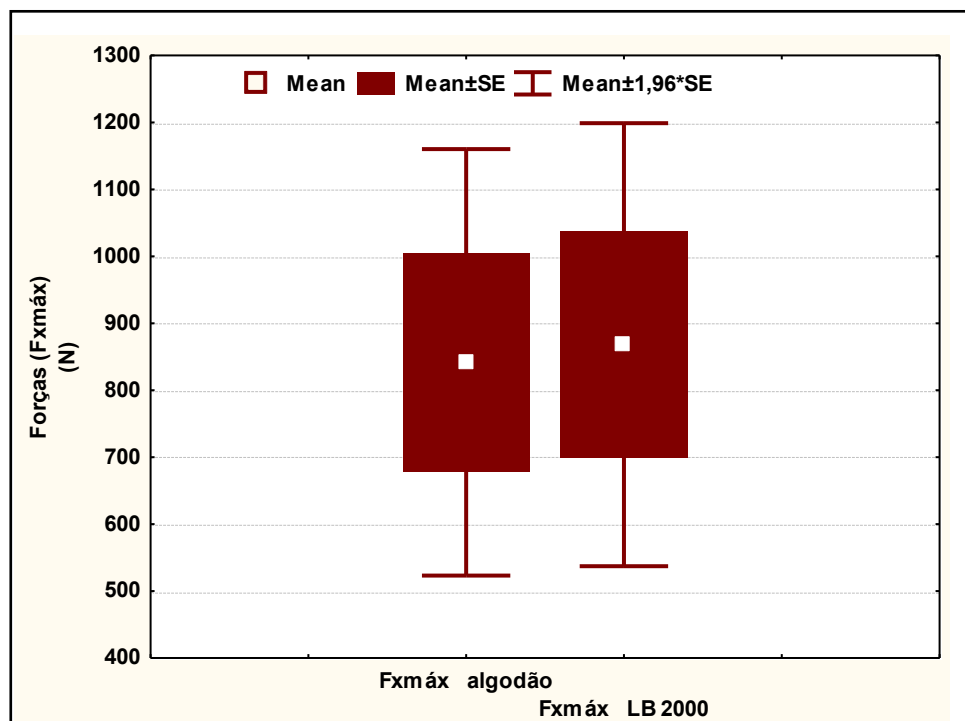


Figura 4.17. Gráfico Comparativo da média de $F_{xmáx}$ entre o óleo vegetal comestível a base de Algodão e o óleo vegetal comercial LB 2000.

4.2.2. Desempenho dos fluidos de corte de base vegetal em relação ao acabamento superficial (rugosidades) e a vibração (aceleração)

O acabamento superficial de peças usinadas por processos convencionais tais como: torneamento, furação, retificação e outros são fortemente afetados por fatores como: parâmetros de corte, desgaste da ferramenta empregada no processo, o uso ou não de fluido de corte, etc. (DINIZ et al, 2006). O fresamento em alta velocidade enfrenta dificuldades na caracterização e controle da vibração da ferramenta de corte. O efeito da vibração é importante, pois influencia significativamente o acabamento e tolerância das peças usinadas.

As Figuras 4.18 a 4.25 mostram, de acordo com as condições de usinagem, a influência da velocidade de corte (v_c), do avanço (f_z) e da profundidade de corte (a_p) sobre o acabamento superficial (representado pelas rugosidades médias (R_a) e rugosidades máximas (R_y) e sobre a vibração (representada pela aceleração), para o corte a seco, com abundância de fluido (emulsão / jorro) e com aplicação MQF na vazão de 50 ml/h dos óleos de base vegetal, os demais resultados foram colocados no apêndice B deste trabalho.

➤ **Condição de usinagem 1: v_c : 165 m/min; f_z : 0,15 mm/rot.; a_p : 1 mm**

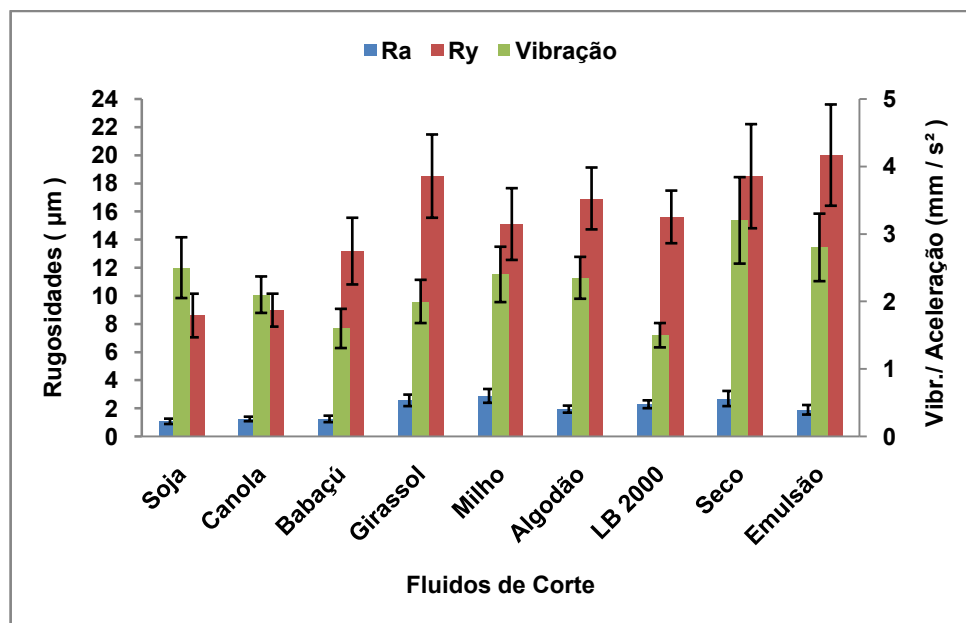


Figura 4.18. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: Rugosidades médias e máximas e Vibração, na condição de usinagem 1.

- **Condição de usinagem 2: v_c : 210 m/min; f_z : 0,15 mm/rot.; a_p : 1 mm**

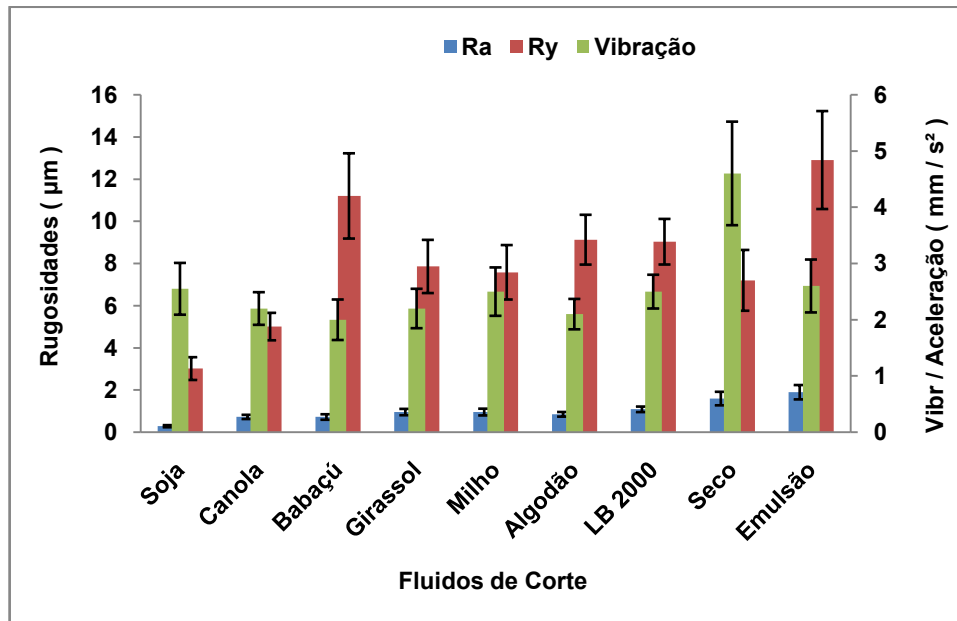


Figura 4.19. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: Rugosidades médias e máximas e Vibração, na condição de usinagem 2.

- **Condição de usinagem 3: v_c : 165 m/min; f_z : 0,30 mm/rot.; a_p : 1 mm**

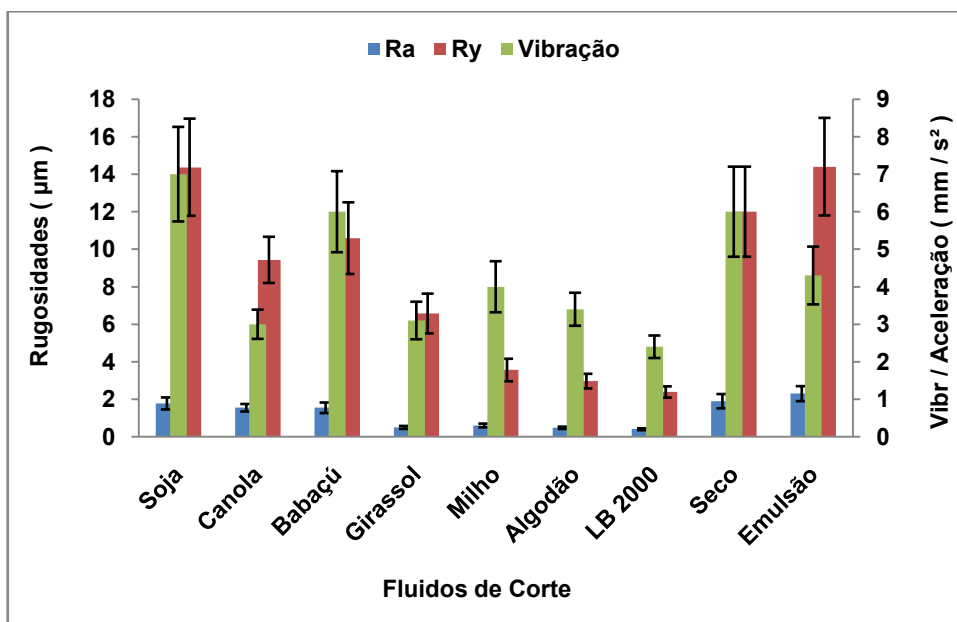


Figura 4.20. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: a) Rugosidades médias e máximas, b) Vibração, na condição de usinagem 3.

- **Condição de usinagem 4: v_c : 210 m/min; f_z : 0,30 mm/rot.; ap: 1 mm**

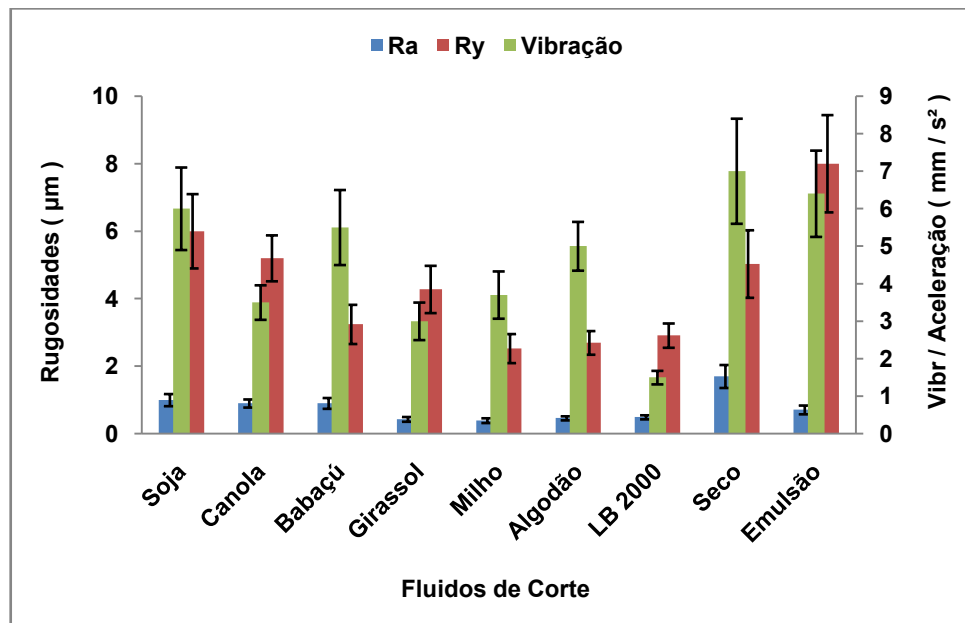


Figura 4.21. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: Rugosidades médias e máximas e Vibração, na condição de usinagem 4.

- **Condição de usinagem 5: v_c : 165 m/min; f_z : 0,15 mm/rot.; ap: 2 mm**

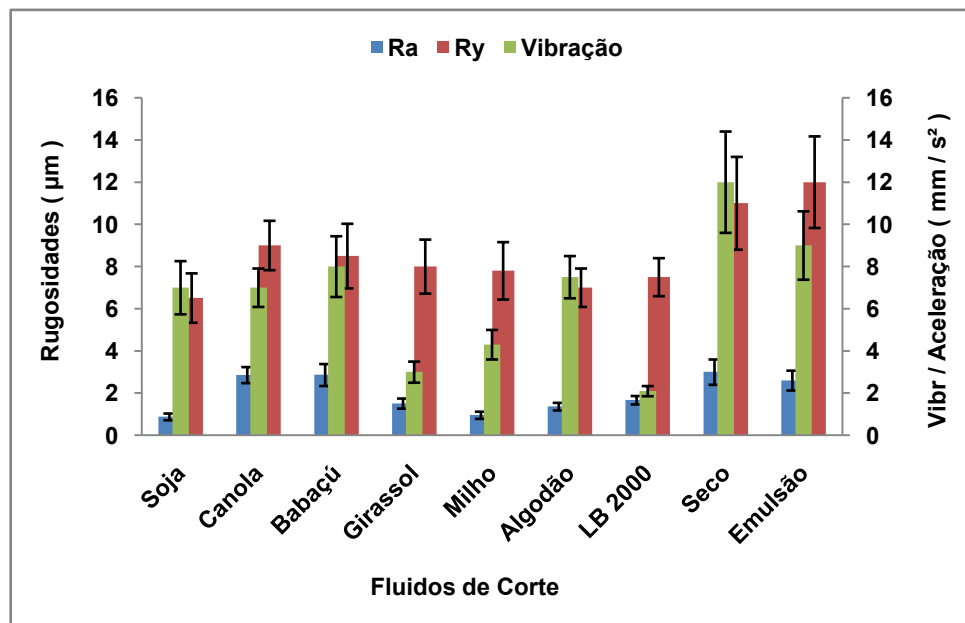


Figura 4.22. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: Rugosidades médias e máximas e Vibração, na condição de usinagem 5.

- **Condição de usinagem 6: v_c : 210 m/min; f_z : 0,15 mm/rot.; ap: 2 mm**

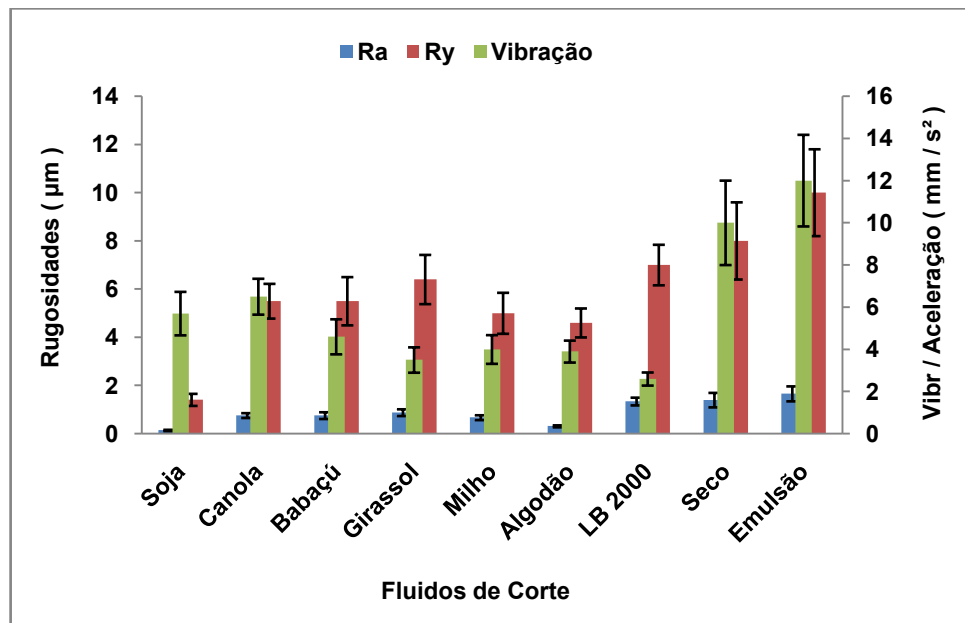


Figura 4.23. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: Rugosidades médias e máximas e Vibração, na condição de usinagem 6.

- **Condição de usinagem 7: v_c : 165 m/min; f_z : 0,30 mm/rot.; ap: 2 mm**

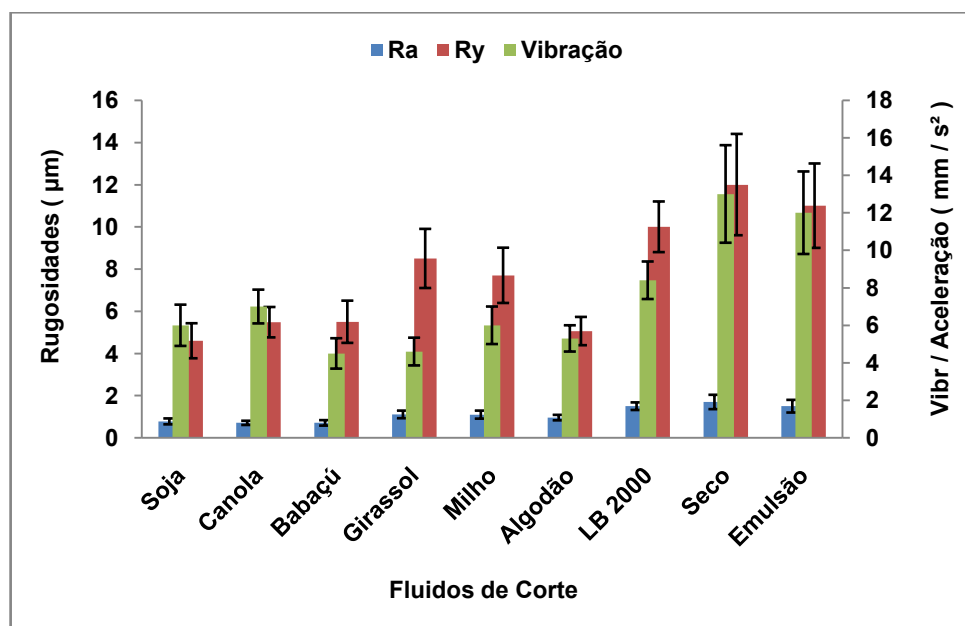


Figura 4.24. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: Rugosidades médias e máximas e Vibração, na condição de usinagem 7.

➤ **Condição de usinagem 8: v_c : 210 m/min; f_z : 0,30 mm/rot.; a_p : 2 mm**

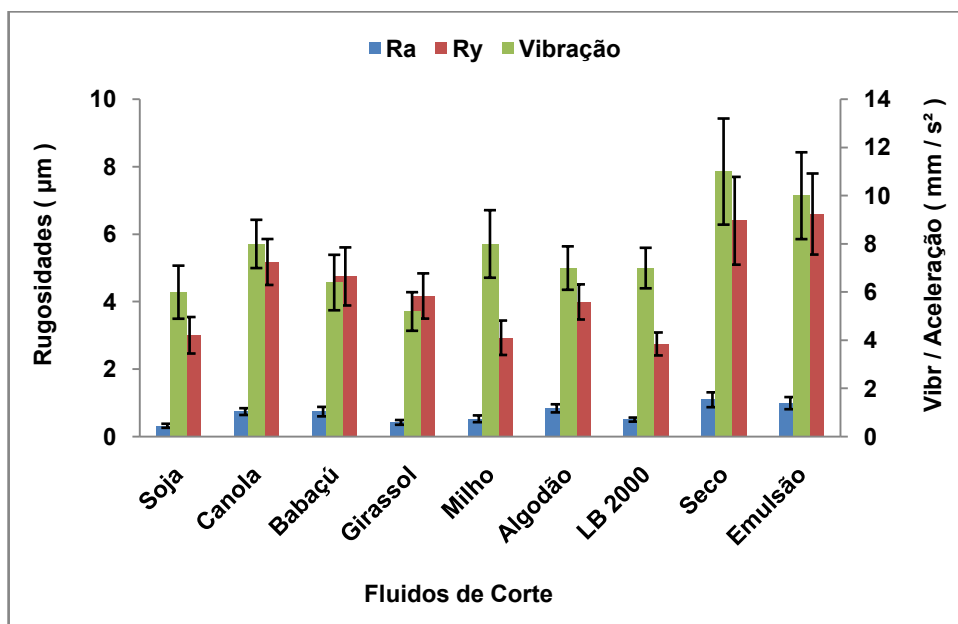


Figura 4.25. Desempenho dos fluidos de usinagem em relação às variáveis de saída: Rugosidades médias e máximas e Vibração, na condição de usinagem 8.

A utilização de fluidos de corte melhora a eficiência dos processos de usinagem proporcionando: aumento da vida da ferramenta de corte, maior controle de tolerâncias dimensionais, melhoria no acabamento superficial da peça usinada, redução nas forças de usinagem e amenização de vibrações. Da Fig.4.18 até a Fig. 4.25, mostrou-se graficamente o comportamento do acabamento superficial em função das rugosidades média e máxima e da vibração medida pela aceleração em relação à variação das condições de corte, dos fluidos de base vegetais comestíveis estudados. As análises destas figuras mostram uma tendência geral da rugosidade diminuir com o aumento da velocidade de corte (por causa de uma redução da resistência do material em altas temperaturas), com exceção do fluido emulsionável, em todos os resultados de rugosidade apresentados neste tópico, principalmente a altas velocidades de corte, o fluido emulsionável não se mostrou eficaz, inclusive inferior em algumas situações à condição a seco, estes fluidos apresentam aditivos que necessitam de uma temperatura mínima para tornarem-se ativos. Somente em elevadas velocidades de corte a temperatura ótima é atingida e a capacidade de lubrificação é ativada. A condição a seco apresenta uma rugosidade superior às demais, praticamente em todas as condições de usinagem adotadas.

Comprovando-se a literatura, a rugosidade média (R_a) varia proporcionalmente com o avanço (f_z). À medida que a velocidade de corte (v_c) cresce, R_a oscila. Diniz et al (1999), explicam este fato afirmando que a oscilação da rugosidade é a resposta que o sistema máquina de fixação dá, em termos de vibração, ao crescimento de " v_c ". Observa-se também que a profundidade de corte (a_p) não exerce uma influência significativa em " R_a ". As avaliações dos parâmetros de corte nos sinais foram feitas com 1 inserto na fresa. Optou-se aqui por demonstrar a influência dos sinais por meio de sua RMS (do inglês *Root Mean Square*) que dá a magnitude do sinal e assim uma visão da influência dos parâmetros nele.

Avaliando as figuras apresentadas, vê-se que os sinais RMS cresceram à medida que a velocidade aumentou para todos os parâmetros avaliados. Isso pode ser explicado pelo fato que o aumento da velocidade de corte aumenta a frequência de excitação do sistema ferramenta-peça o que faz com que a RMS também cresça. Pode-se notar também que o sinal vibracional (RMS) cresce à medida que os avanços crescem. O percentual de crescimento depende das demais condições de corte (v_c e a_p). O crescimento do sinal aumentando o avanço por dente já era esperado uma vez que o sistema é mais solicitado em virtude da maior quantidade de material retirado, o que gera maior vibração.

Avaliando o sinal RMS em função da profundidade de corte, vê-se que assim como a figura anterior que avaliava o sinal RMS em função do avanço por dente, a RMS cresce à medida que se aumenta a profundidade de corte para todos os parâmetros avaliados. Isso pode ser explicado pelo fato de que aumentando a profundidade de corte, aumenta a seção do cavaco o que aumenta a força de corte e conseqüentemente aumenta os sinais vibracionais. A condição a seco apresentou um sinal de vibração superior aos demais fluidos, praticamente em todas as condições de usinagem adotadas.

Em função dos resultados das rugosidades médias (R_a), pretende-se identificar qual dos óleos vegetais estudados teve um melhor desempenho nesta etapa. Uma forma de se avaliar qual desses fluidos realmente influenciou na mesma é através do uso da inferência estatística com utilização de testes de hipóteses. No caso desta pesquisa, mais uma vez utilizou-se o teste t de student para dados pareados (comparação entre " R_a " obtidas pela aplicação dos óleos vegetais comestíveis, com " R_a " obtidas tanto da condição a seco quanto da aplicação do fluido LB 2000) considerando duas hipóteses, uma considerada nula, onde não existe diferença significativa entre as médias de R_a , independentemente do óleo de base vegetal aplicado como fluido de corte e outra considerada não nula que se contrapõe à primeira. Este procedimento é evidenciado através da Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Análise estatística entre óleos vegetais no critério rugosidade média (Ra) pelo teste de hipótese (t de student pareado) ao nível de significância de 5 %, ($\alpha = 0,05$).

ÓLEO COMESTÍVEL VEGETAL	COMPARAÇÃO ($\alpha = 0,05$)	
	A SECO (valor p)	ÓLEO LB 2000 (valor p)
SOJA	0,02	0,48
CANOLA	0,06	0,99
BABAÇÚ	0,06	0,99
GIRASSOL	0,03	0,68
MILHO	0,03	0,63
ALGODÃO	0,005	0,33

De acordo com os resultados obtidos na aplicação do teste, quando comparamos todos os óleos de bases vegetais utilizados como fluidos de corte com a condição a seco e com o óleo LB 2000, observa-se que as médias das rugosidades médias (Ra), mostraram diferenças significativas quando comparadas com a condição a seco ($p - \text{valor} < \alpha$), exceção apenas para os óleos à base de canola e a base de babaçu, enquanto na comparação das mesmas com o fluido LB 2000 (comercial), observa-se que não há diferença significativa, pois em todas as comparações o valor da estatística t pareada foi maior que o nível de significância alfa ($\text{valor } p > \alpha$), conforme indicado na Tabela 4.5. Igualmente, quando comparamos o desempenho de todos, observa-se que o óleo a base de algodão possui uma pequena vantagem em relação aos demais, confirmando esse comportamento, mostrou-se também esse comparativo das médias e dos desvios padrões entre o mesmo com o óleo LB 2000, conforme Fig. 4.26. Nota-se que houve uma redução acentuada, em torno de 25% no valor médio da rugosidade média quando da utilização do referido óleo vegetal comestível. Acredita-se que o bom desempenho desse óleo se deu em função de sua capacidade de troca de calor por convecção que facilitou a refrigeração do processo e também em função da sua viscosidade, proporcionando boa aderência na superfície e consequentemente uma lubrificação adequada. Portanto adotando-se o critério da rugosidade média ao nível de confiança de 95% optou-se em utilizar o óleo de algodão na 2ª etapa dos experimentos (testes de vida da ferramenta de corte).

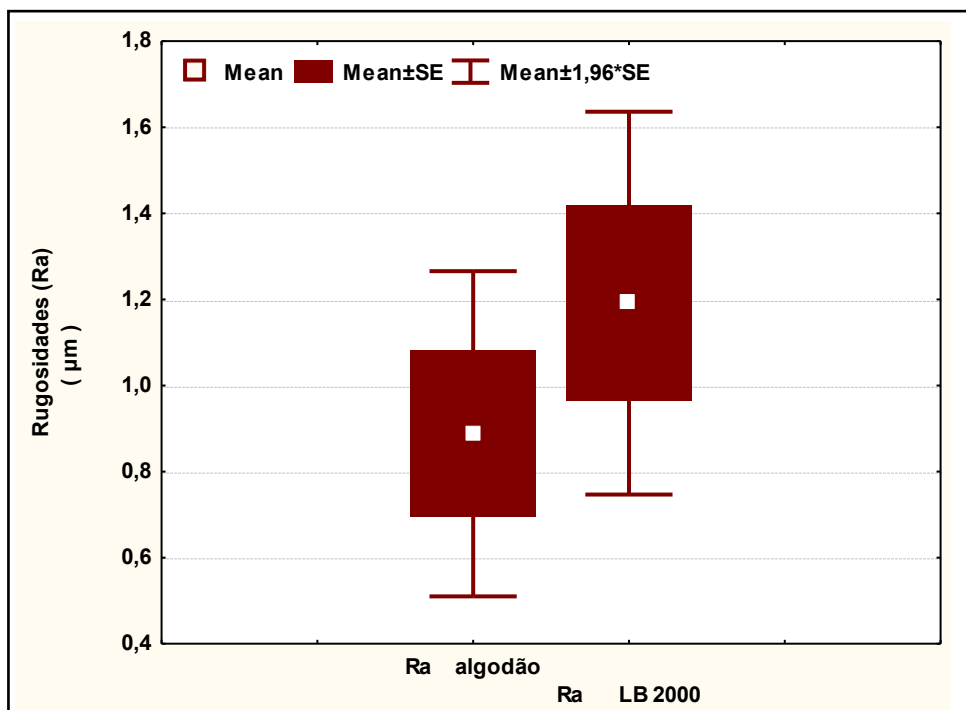


Figura 4.26. Gráfico Comparativo da média de “Ra” entre o óleo vegetal comestível a base de Algodão e o óleo vegetal comercial LB 2000.

4.2.3. Desempenho dos fluidos de corte de base vegetal em relação à vida da ferramenta de corte

Analisou-se o comportamento da vida da ferramenta no processo de fresamento frontal, com a eliminação ou minimização do fluido de corte. Monitorou-se a evolução do desgaste nos flancos de cada gume da ferramenta. A Figura 4.27 mostra, de acordo com as condições de usinagem, a influência da velocidade de corte (v_c), do avanço (f_z) e da profundidade de corte (a_p) sobre a vida da ferramenta de corte, utilizando-se como critério de fim de vida o desgaste médio de flanco (VB_B) de 0,35 mm. A vida foi avaliada em função do volume removido de material - VRM, para o corte a seco e para o corte com os óleos de algodão, canola e LB 2000, com aplicação MQF na vazão de 50 ml/h. Outras imagens do desgaste médio de flanco foram colocadas no apêndice C deste trabalho.

A Tabela 4.6 mostra as condições de usinagem utilizadas nos ensaios de vida da ferramenta de corte.

Tabela 4.6. Condições de usinagem para os ensaios de vida da ferramenta de corte

Condição de corte	Vc (m/min)	fz (mm/rot)	ap (mm)	VB _B (mm)
I	210	0,20	2,0	0,35
II	450	0,20	2,0	0,35
III	210	0,30	2,0	0,35
IV	450	0,30	2,0	0,35

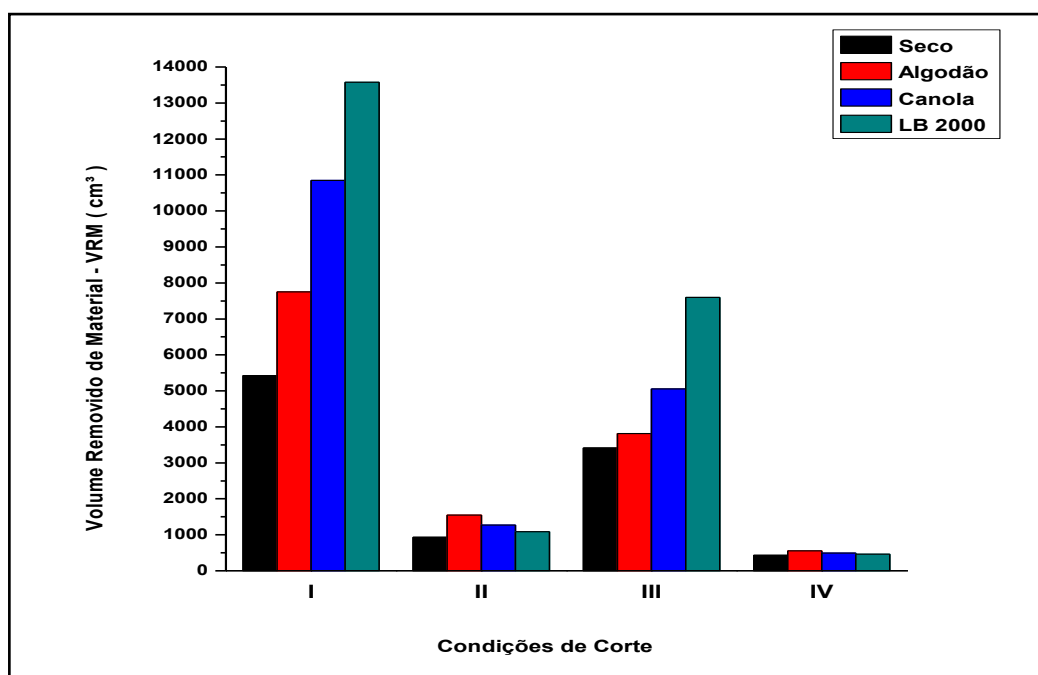


Figura 4.27. Vida da ferramenta em função do volume removido de material - VRM para cada condição de corte.

No fresamento frontal de aços e materiais similares com ferramentas de metal duro sempre irá acontecer à flutuação cíclica da temperatura. A ferramenta aquece no período ativo (de formação de cavacos) e resfria no período inativo (sem formação de cavacos) a cada ciclo ou giro da ferramenta (De MELO et al, 2003). Isto causa flutuações cíclicas das tensões superficiais nas ferramentas de corte, podendo gerar trincas por fadiga térmica (MACHADO et al, 2011). Neste processo, quanto maior for a diferença das temperaturas no período ativo em relação às temperaturas no período inativo, maiores serão as tensões e, portanto, maior a probabilidade de gerar as trincas térmicas (De MELO, 2001). Os fluidos de corte, quando aplicados e atuando como refrigerantes, podem aumentar esta diferença de temperatura, contribuindo para aumentar a probabilidade do aparecimento ou multiplicação das trincas.

A Figura 4.27 mostra que em todas as condições de corte a condição a seco apresentou o pior desempenho. Em alguns casos o fluido superou a condição a seco em mais de 100%. Isto é uma constatação de que o fluido de corte aplicado na forma de MQF é uma alternativa interessante para o fresamento frontal. Neste processo, usando metal duro (revestido ou não) na usinagem de aços, já foi mostrado que a aplicação do fluido de corte em abundância é pior que a condição a seco (VIEIRA et al, 2001; De MELO et al, 2006). Entretanto, trabalhos anteriores já indicaram vantagens da técnica MQF em relação à condição a seco (TEIXEIRA FILHO, 2006). Assim, o processo MQF usado está agindo apenas marginalmente como refrigerante (o jato de ar do sistema contribui com isto), mas a sua ação lubrificante deve estar reduzindo a geração de calor e com isto diminuindo a diferença de temperatura no ciclo, reduzindo ou eliminando as trincas térmicas. Se a operação estiver ocorrendo sem essas trincas, às menores temperaturas são favoráveis, pois reduzem as taxas de desgaste por qualquer mecanismo (MACHADO et al, 2011).

Na condição a seco a ferramenta permanece com todo o seu volume em níveis de temperatura elevados, já que os modos de troca de calor presentes, como a condução interna na própria ferramenta e a convecção com o ambiente, não são suficientemente eficazes para reduzir esses níveis. Aliado a isto estão às elevadas forças atuantes. Isso contribui para a ocorrência dos mecanismos de desgaste termicamente ativados como a difusão, a deformação da aresta principal de corte por tensões de compressão e a deformação da superfície de saída pelas elevadas tensões de cisalhamento atuantes. Irá, também, contribuir para reduzir a resistência da ferramenta contra os demais mecanismos de desgaste.

Nas ferramentas de metal duro recobertas, o desgaste (de flanco) cresce lentamente enquanto a cobertura resiste à abrasão. Depois, com a perda desta proteção, cresce de forma acelerada. Ao observar os três parâmetros principais de usinagem: velocidade de corte (v_c), avanço (f_z) e profundidade de corte (a_p), cada um tem um efeito sobre a vida útil da ferramenta. A velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia a progressão do desgaste, seguida pelo avanço e pela profundidade de corte. A profundidade de corte tem o menor efeito, mas acredita-se que em função do seu valor fixo adotado (2 mm), possa ter contribuído com o aumento da vibração do conjunto, calor excessivo gerado, aumento das forças de corte com possíveis quebras da pastilha em algumas situações. Já o avanço, em função de sua variação (0,20 mm/rot e 0,30 mm/rot), pode ter contribuído promovendo um desgaste rápido de flanco, proporcionando craterizações e deformações plásticas. A elevação da produtividade (maior VRM) decorreu dos menores níveis de desgaste sofridos pela ferramenta, associados à menor velocidade de corte, pois uma velocidade de corte alta (450 m/min) aumenta a quantidade de calor, sem um aumento da área da ferramenta que

recebe este calor. A redução da velocidade de corte (210 m/min) proporcionou menor temperatura na zona de corte (que minimiza desgastes de flanco, de cratera e deformação plástica da aresta) e menores níveis de vibração, favorecendo a integridade da ferramenta durante o processo de usinagem. Assim, a velocidade de corte é a maior responsável pela elevação da temperatura nos processos de usinagem e o seu aumento pode contribuir no desgaste prematuro da ferramenta de corte.

Os melhores resultados foram encontrados para o fluido LB 2000 seguido do óleo de canola para as condições de baixa velocidade de corte, evidenciando a boa capacidade lubrificante destes fluidos. Já nas condições de altas velocidades de corte houve um razoável desempenho do óleo do algodão, aumentando a dissipação do calor e evidenciando assim a boa capacidade refrigerante deste fluido. As condições de corte utilizadas são extremamente altas. Isso promove uma intensa geração de calor, o que exige fluidos com boas propriedades refrigerantes.

O bom desempenho dos óleos vegetais comestíveis, algodão e canola são justificados em função de suas capacidades de retirada de calor e de suas viscosidades adequadas, o que proporciona uma melhor aderência do fluido na área de contato ferramenta - peça (conforme testes específicos de capacidade refrigerante, lubrificante e de molhabilidade); estas propriedades são importantes, pois facilitam nas operações de usinagem com altas velocidades de corte.

4.2.4. Avaliação do desgaste da ferramenta de corte via microscopia óptica e de varredura

A microscopia eletrônica tem sido uma ferramenta de trabalho muito utilizada pelos pesquisadores em várias áreas de concentração, uma vez que ela abrange um conjunto de técnicas que possibilitam a caracterização da morfologia do material, composição química e determinação da estrutura atômica, tanto de metais, cerâmicas e polímeros, como de espécimes biológicas. O MEV permite observações diretas das estruturas poliméricas, sendo a principal vantagem o método simples de preparação das amostras na maioria dos casos. A possibilidade de caracterização da microestrutura pode ser realizada em uma escala de dimensões variando de alguns milímetros a frações nanométricas (HOLINK et al, 1979).

Para a medição do desgaste de flanco com maior precisão e identificação das causas dos desgastes nas ferramentas de corte, foi utilizado um microscópio eletrônico de

varredura (MEV) disponível no LEPU – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da FEMEC / UFU. Nas Figuras 4.28 a 4.31 são apresentadas imagens das ferramentas de corte empregadas no procedimento experimental (com auxílio tanto do microscópio ótico quanto do eletrônico por varredura), apresentando o desgaste de flanco médio no fresamento a seco, de acordo com as condições de usinagem indicadas. Outras imagens mostrando o desgaste da ferramenta de corte foram colocadas no apêndice C deste trabalho.

(Detalhe A)

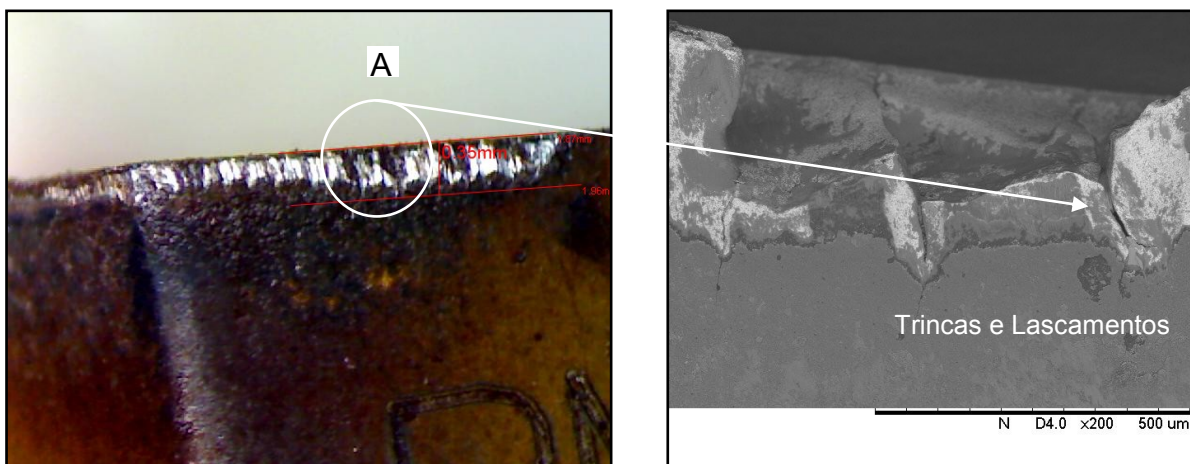


Figura 4.28. Desgaste médio de flanco. Seco, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.

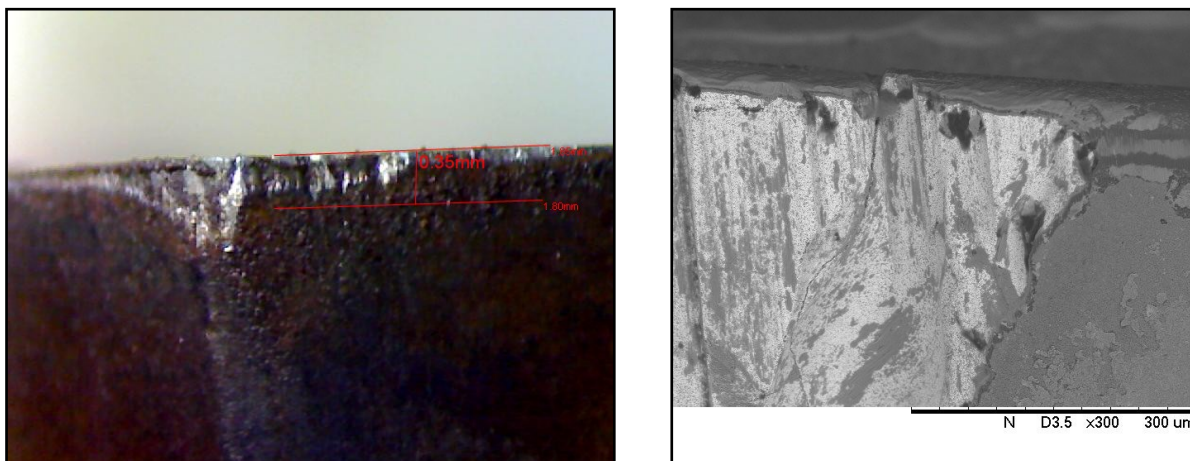


Figura 4.29. Desgaste médio de flanco. Seco, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.

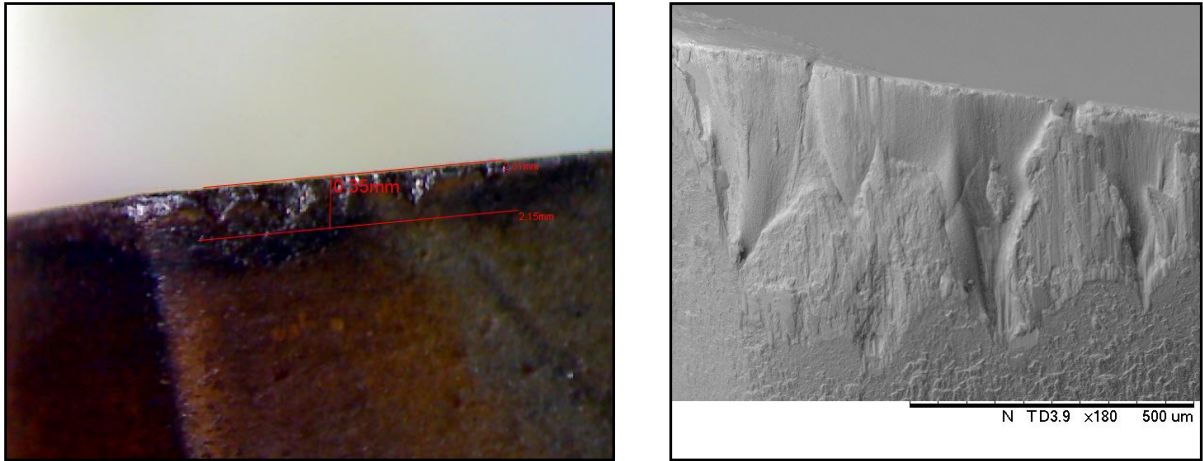


Figura 4.30. Desgaste médio de flanco. Seco, $vc = 450$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.

(Detalhe B)

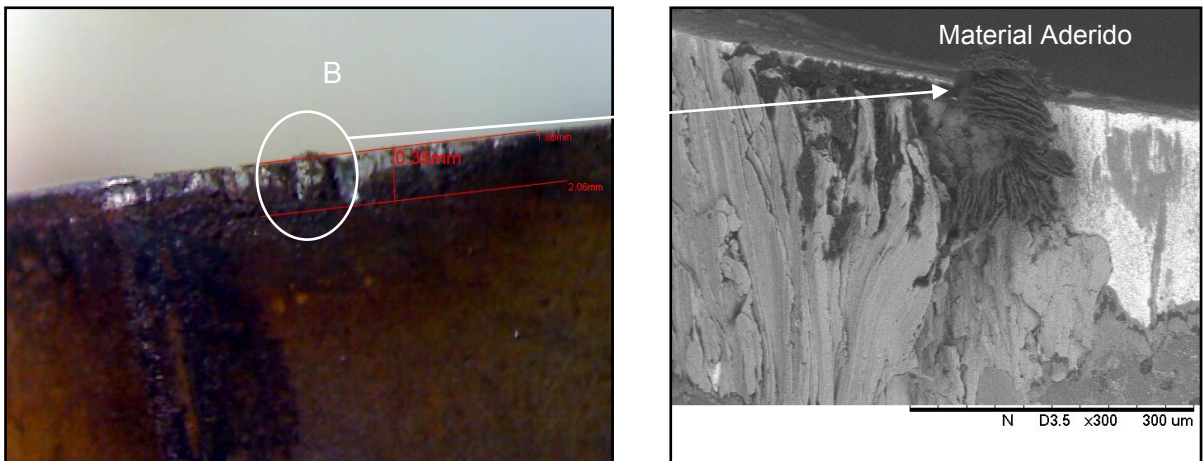


Figura 4.31. Desgaste médio de flanco. Seco, $vc = 450$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.

Na condição a seco, o calor gerado se distribui entre a peça, a ferramenta e o cavaco. Com isto, a ferramenta sofre uma intensa elevação de temperatura. Por outro lado, o grande aquecimento da região de corte promove o amolecimento localizado do material da peça. Isto, de certa forma, atua facilitando o corte. Ao se comparar esta condição com outras a que foram impostas à mesma ferramenta, esta foi a mais severa e que resultou, também, na menor vida. Na análise das Figs. 4.28 a 4.31 é evidente que as trincas por fadiga térmica estão presentes e são as responsáveis diretas pela rápida deterioração da aresta de corte e baixa vida das ferramentas. Além das trincas de origem térmica, há indícios de adesão de material que podem ser percebidos na superfície de saída e nota-se ainda a retirada do revestimento e o aparecimento do substrato. Isto implica na possibilidade de mecanismo de

desgaste adesivo (ou attrition) também estar contribuindo no processo de destruição da aresta de corte da ferramenta.

Nas Figuras 4.32 a 4.43 são apresentadas imagens das ferramentas de corte empregadas no procedimento experimental, apresentando o desgaste de flanco médio no fresamento com aplicação MQF na vazão de 50 ml/h dos óleos de algodão, canola e LB 2000 de acordo com as condições de usinagem.

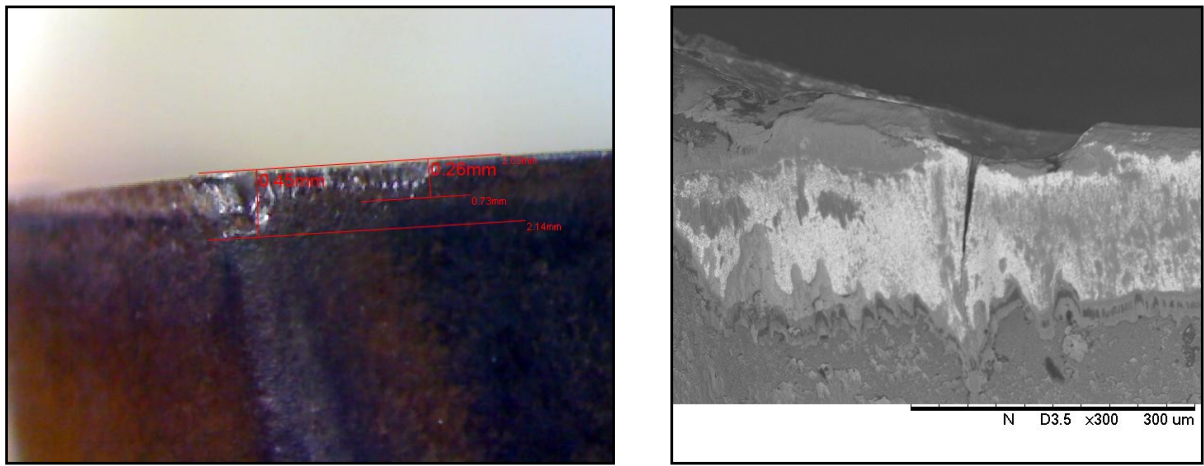


Figura 4.32. Desgaste médio de flanco. Algodão, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.

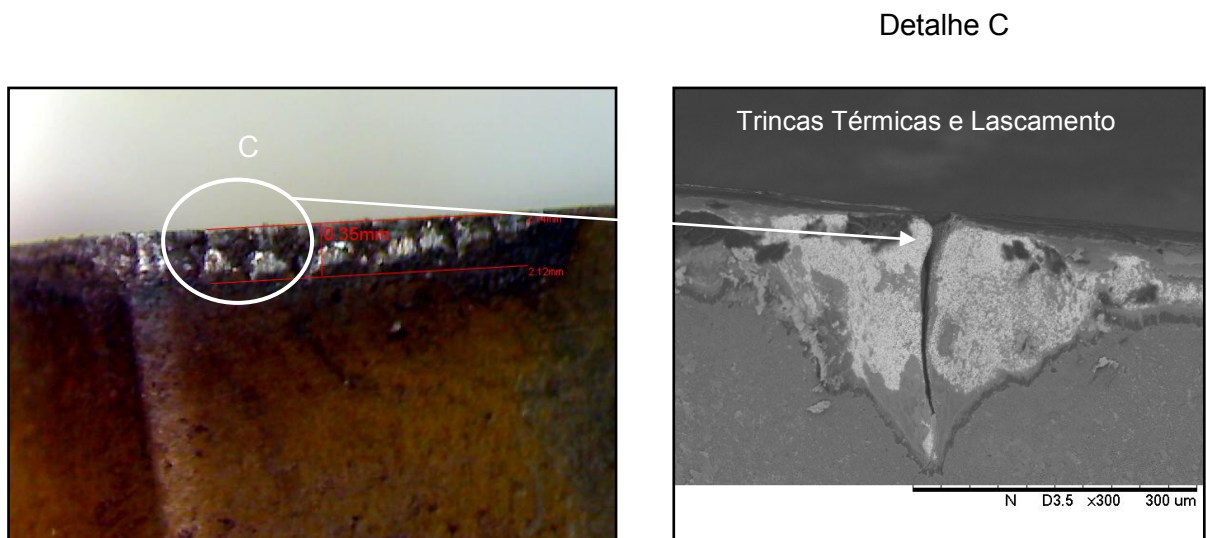


Figura 4.33. Desgaste médio de flanco. Algodão, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.

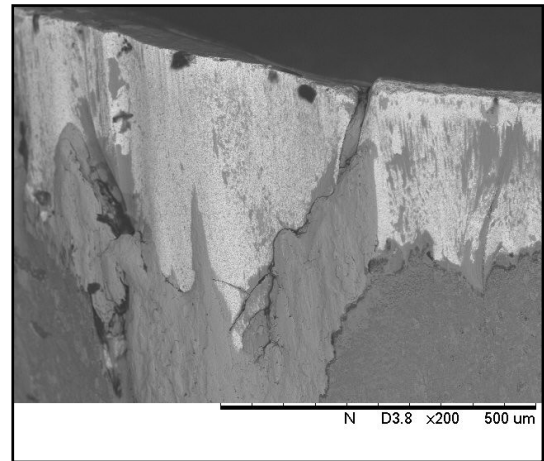


Figura 4.34. Desgaste médio de flanco. Algodão, $vc = 450$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.

Detalhe D

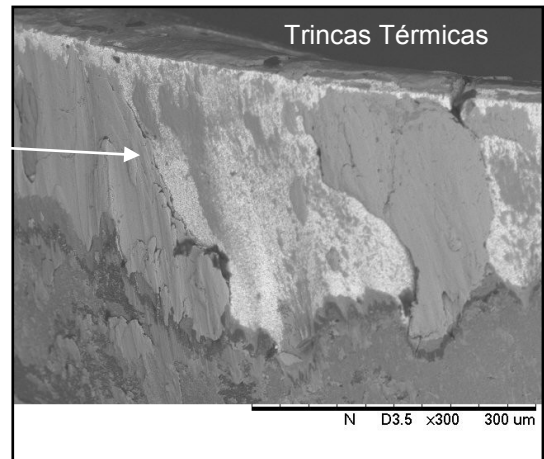
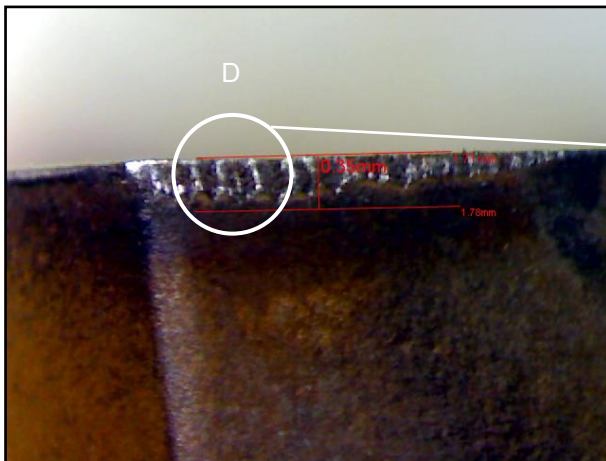


Figura 4.35. Desgaste médio de flanco. Algodão, $vc = 450$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.

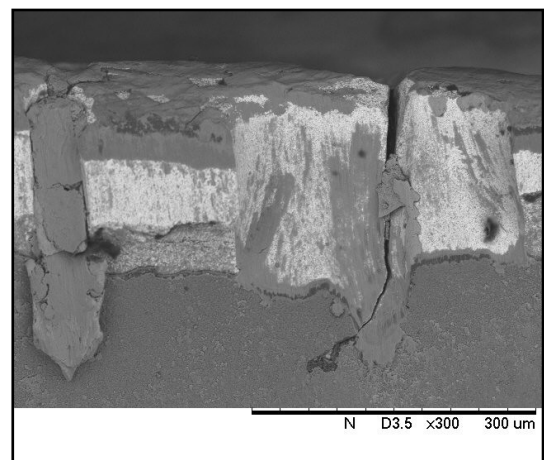
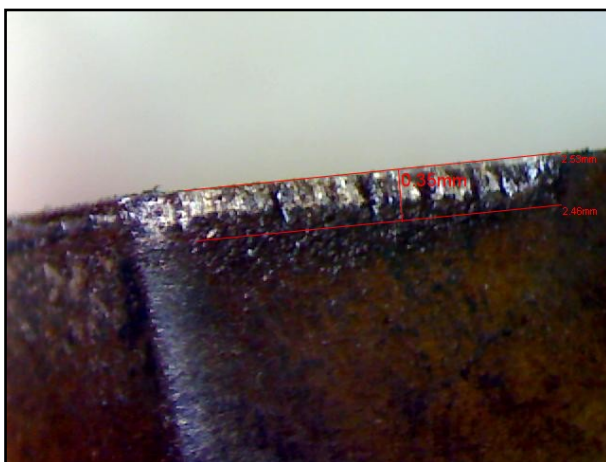


Figura 4.36. Desgaste médio de flanco. Canola, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.

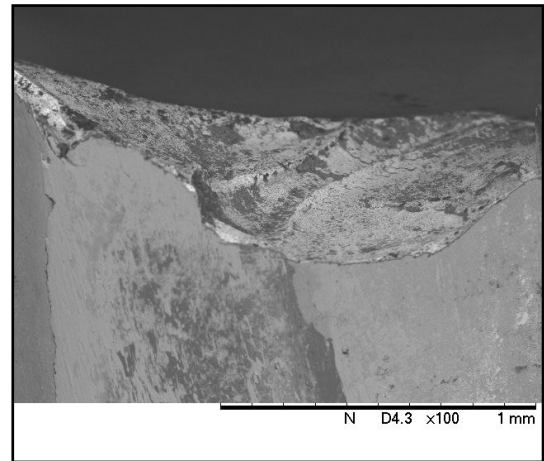
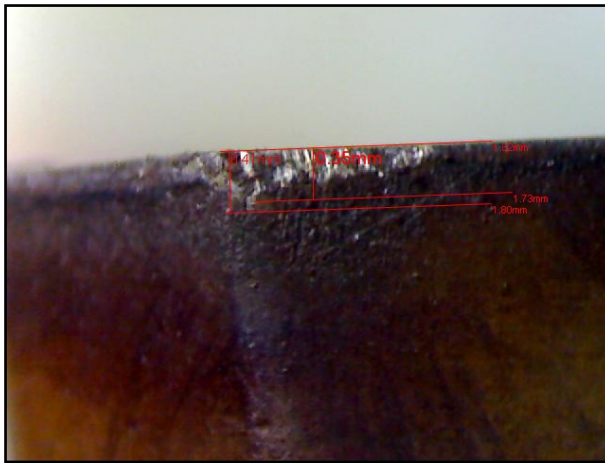


Figura 4.37. Desgaste médio de flanco. Canola, $vc= 210$ m/min, $fz= 0,30$ mm/rev.

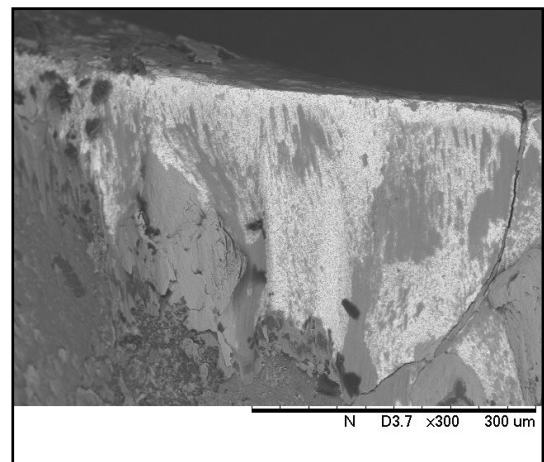
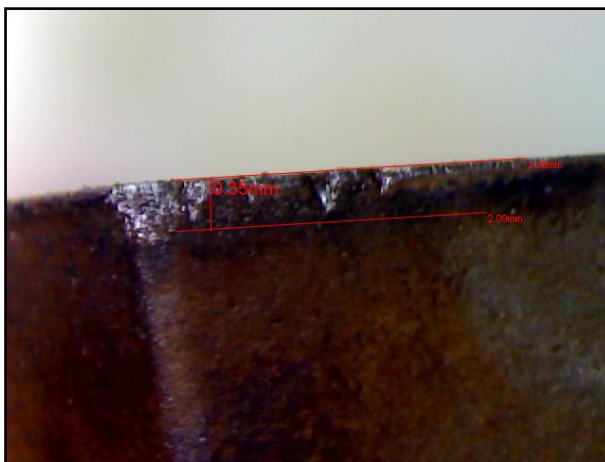


Figura 4.38. Desgaste médio de flanco. Canola, $vc= 450$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.

Detalhe E

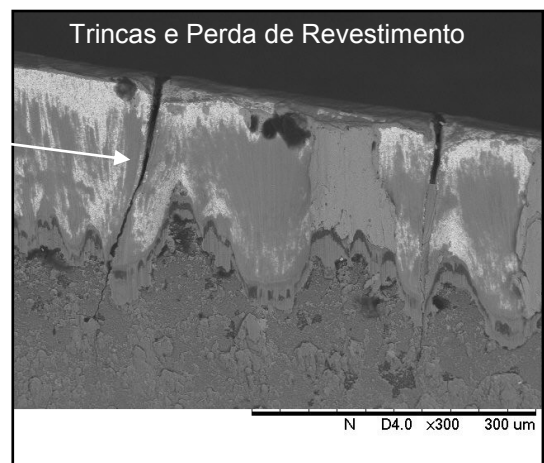
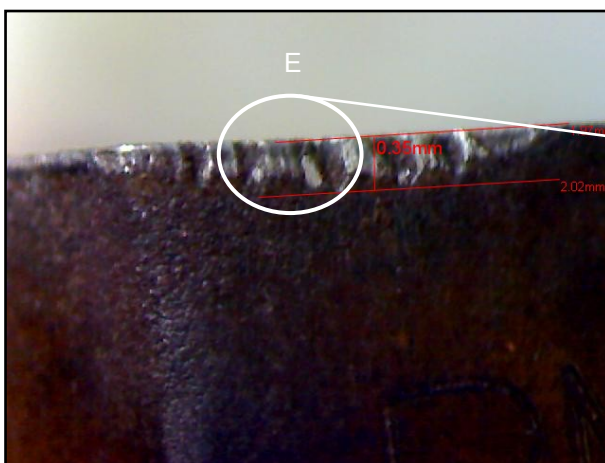
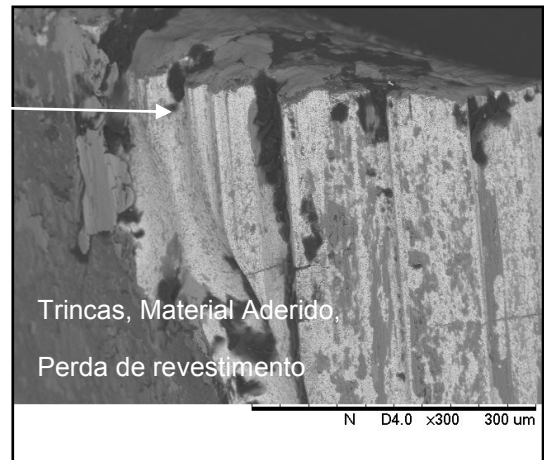
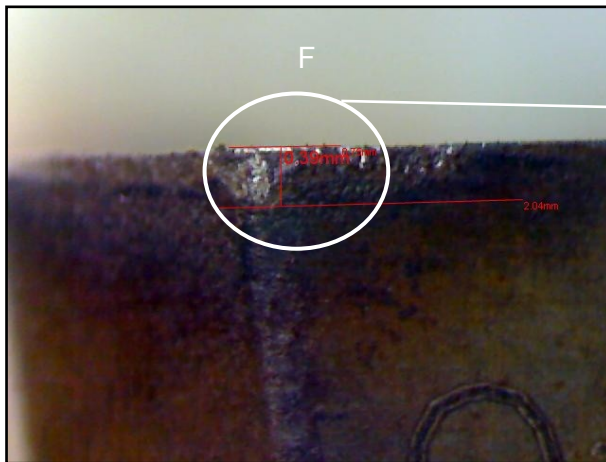
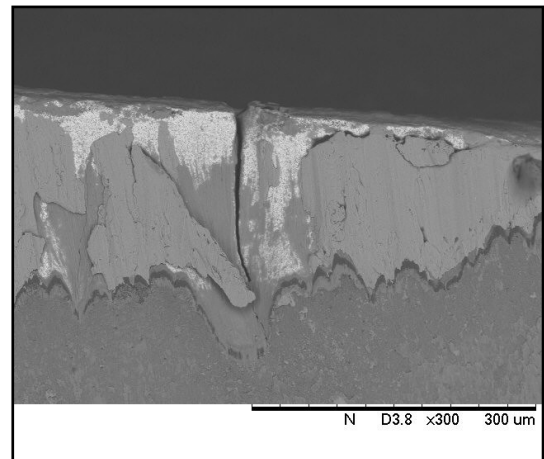
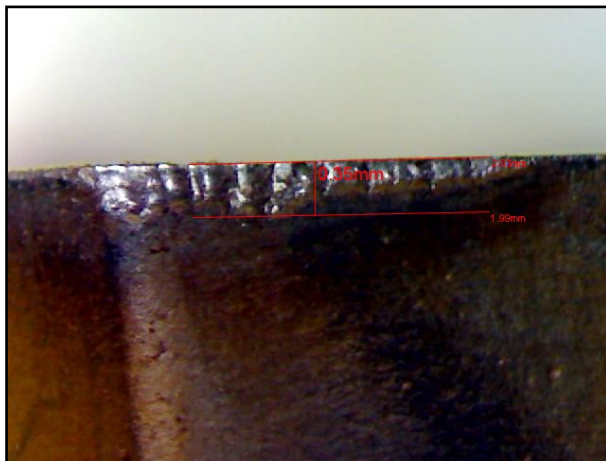
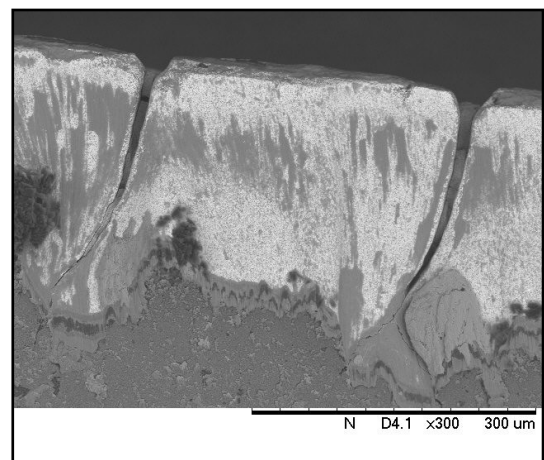


Figura 4.39. Desgaste médio de flanco. Canola, $vc= 450$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.

Detalhe F

Figura 4.40. Desgaste médio de flanco. LB 2000, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.Figura 4.41. Desgaste médio de flanco. LB 2000, $vc = 210$ m/min, $fz = 0,30$ mm/rev.Figura 4.42. Desgaste médio de flanco. LB 2000, $vc = 450$ m/min, $fz = 0,20$ mm/rev.

Detalhe G

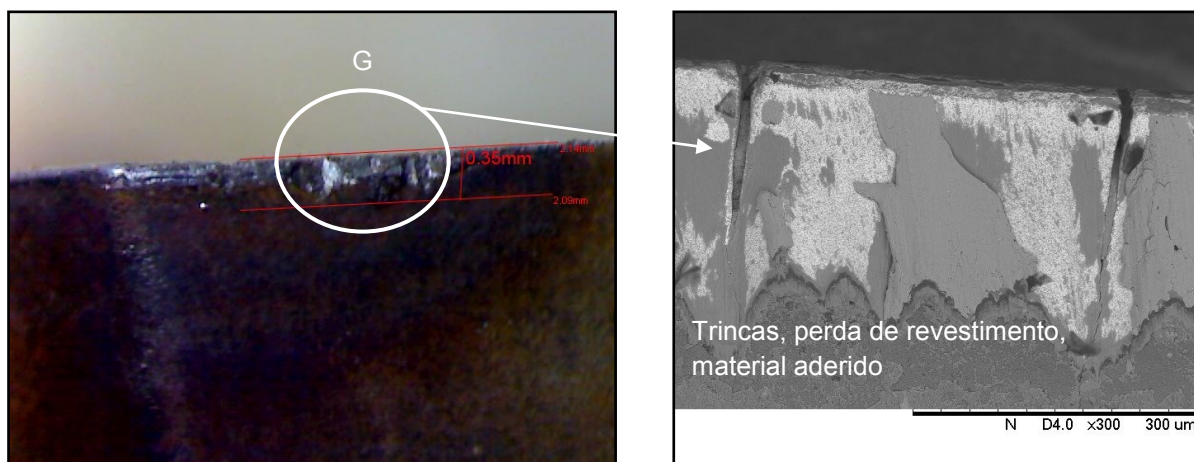


Figura 4.43. Desgaste médio de flanco. LB 2000, $v_c = 450$ m/min, $f_z = 0,30$ mm/rev.

As análises destas figuras confirmam que os fluidos de corte aplicados pela técnica MQF não alteraram o mecanismo de falha das ferramentas de corte. As trincas de origem térmicas continuaram se apresentando como o principal método de falha da cunha cortante das ferramentas de metal duro usadas nos experimentos. Entretanto, os resultados das vidas maiores com estes fluidos de corte indicam que o processo de destruição da ferramenta foi retardado. Isto implica dizer que o sistema MQF reduziu as diferenças de temperaturas das ferramentas dos períodos ativos em relação aos períodos inativos. O pressuposto de que o sistema poderia não afetar muito a refrigeração e atuar bem como lubrificante se confirmou. Isto, de acordo com a literatura (De MELO, 2001 e MACHADO et al, 2011), irá causar redução nas tensões e geração de calor, favorecendo o processo de resistência ao desgaste por parte da ferramenta de corte.

A técnica MQF tem pouca capacidade de refrigeração e o objetivo de sua utilização é promover uma pequena lubrificação no corte e minimizar o efeito da flutuação da temperatura na ferramenta. Deste modo, o atrito na interface cavaco-ferramenta é reduzido, além de minimizar as adesões de material da peça na aresta de corte. Como resultado desta maior eficiência no corte ocorre um acréscimo na vida da ferramenta.

Os resultados demonstram que a aplicação da técnica MQF produziu os efeitos desejados na vida da ferramenta quando comparado com usinagem isenta de fluido. Empregando-se os óleos de base vegetal algodão, canola e LB 2000, percebe-se uma uniformidade no desgaste de flanco, principalmente a altas velocidades de corte, mas percebe-se também a presença de trincas térmicas, arrancamento de parte do revestimento,

lascamento, abrasão e “attrition”. Como pode ser verificado nas figuras apresentadas, o desgaste de flanco é formado por adesões e por lascamentos. O lascamento na aresta de corte, apesar de pequenas proporções na superfície de folga, estende-se por uma longa região na superfície de saída. Essas imagens foram identificadas nos detalhes de A a G. A presença de lascamentos na aresta de corte, em muitos casos, pode ser associada à incorreta determinação dos parâmetros de usinagem, do sistema de fixação de ferramenta e peça e/ou da realização da usinagem com elevados níveis de vibração. Verifica-se que ocorreu a extrusão de material próximo à região de corte entre a peça e a superfície de folga da ferramenta. Além disso, em razão das elevadas pressões envolvidas no corte, ocorrem elevadas forças de adesão entre o material extrudado e a superfície de folga da ferramenta. Em função das elevadas forças de adesão entre o material extrudado e a aresta de corte, a contínua formação o deslocamento destas adesões, as quais levam consigo partículas da cobertura e do substrato da ferramenta são explicações para a determinação do fim de vida da ferramenta, uma vez que os microlascamentos identificados nas arestas de corte são menores do que o critério de fim de vida da ferramenta.

Pode-se considerar que esses óleos vegetais comestíveis utilizados nesta pesquisa aplicados pela técnica MQF possuem uma boa capacidade lubrificante, mas apenas com uma razoável capacidade refrigerante.

CAPITULO V

5. CONCLUSÕES

Os ensaios de determinação da capacidade lubrificante, refrigerante e de molhabilidade dos fluidos de corte (sem usinagem), mostraram ser importantes ferramentas para a caracterização de desempenho de fluidos de corte. A metodologia proposta mostrou-se eficaz na avaliação das capacidades refrigerantes e lubrificantes dos fluidos de corte testados. O trabalho realizado permitiu que as seguintes conclusões fossem obtidas:

- Nos testes específicos de determinação da capacidade de refrigeração dos fluidos de corte (sem usinagem), dentre os óleos vegetais comestíveis utilizados neste trabalho, observou-se uma maior taxa de resfriamento dos óleos de algodão e de canola, isso se torna uma propriedade importante principalmente quando se usina a altas velocidades de corte.
- A energia específica de corte, obtida no ensaio de riscamento, tem uma relação direta com os resultados da usinagem. Valores altos de energia específica geram maiores taxas de transferência de calor e grandes tensões residuais na peça, comportamento este que ficou evidenciado nos óleos de algodão e canola, enquanto valores de energia específica baixos resultam em menos danos à peça, indicando qualidade e eficiência da ferramenta de corte e esse comportamento ficaram evidenciados no óleo de girassol.
- No ensaio de aderência (molhabilidade), todos os fluidos de corte de base vegetais comestíveis testados apresentaram uma boa aderência à superfície, ou seja, boa capacidade lubrificante e refrigerante.

Após a realização dos ensaios de fresamento frontal do aço ABNT 1045 laminado, com ferramentas de metal duro revestido, sob diversas condições de lubrificação, além do corte a seco, as seguintes conclusões foram obtidas:

- A metodologia proposta para determinar o desempenho dos fluidos de corte de base vegetal aplicados pela técnica MQF se mostrou eficaz, fácil de ser executada e sem necessitar de equipamentos e instrumentos complexos e onerosos. Porém, esta técnica possui vantagens e desvantagens em relação à usinagem com fluido abundante. As vantagens são: redução do volume de descarte de fluidos, produção de peças e cavacos mais limpos, redução de custos de manipulação, limpeza e acondicionamento de fluidos. Contudo, possuem desvantagens. Uma delas é a névoa de óleo gerada durante o uso da mínima quantidade de lubrificante na usinagem, além de ter gerado fumaça, nas condições

de corte utilizadas, que podem ser considerados subprodutos indesejáveis, pois contribuem para aumentar o índice de poluentes em suspensão do ar e tornam-se fatores de preocupação.

- As forças de corte e de avanço diminuem com o aumento da velocidade de corte, devido ao aumento de temperatura e queda da resistência ao cisalhamento do material usinado. Já em relação à variação do avanço, as forças de corte aumentam pela severidade do processo, há um aumento também nas forças de avanço em função do aumento das áreas da seção de corte. Quanto à profundidade de usinagem, as forças de corte e de avanço apresentaram uma tendência de aumento devido também à elevação da área da seção de corte.

- Na condição a seco foi evidenciado o pior desempenho, com aumento substancial das forças de usinagem e potências de corte, além do aumento dos valores das rugosidades médias e máximas e também dos esforços de vibração em praticamente todas as condições de usinagem.

- O fluido LB 2000 (comercial), apropriado para aplicação em sistemas de microlubrificação (MQF), apresentou uma maior regularidade em relação às forças de usinagem (F_u), potências de corte (P_c), acabamento superficial e vibração, em praticamente todas as condições de usinagem testadas. Com relação ao desempenho do fluido emulsionável (5%), o mesmo mostrou-se ineficaz para reduzir as forças, em praticamente todas as condições de usinagem, inclusive inferior em algumas situações à condição a seco. Isto é justificado pela sua maior capacidade refrigerante, que reduz temperatura e aumenta a resistência ao cisalhamento da peça.

- Com relação aos óleos de base vegetal utilizados nesta pesquisa (algodão, babaçú, canola, girassol, milho e soja), de maneira geral, as forças de usinagem e potências de corte foram mais baixas quando empregando os óleos de canola e algodão. Considerando o acabamento superficial, através principalmente das rugosidades médias (R_a), ficou evidente o melhor desempenho do óleo de algodão.

- Nos valores do desgaste médio de flanco (VB_B), representado pelo volume removido de material (VRM) para usinagem em condição de mínima quantidade de fluido (MQF), observou-se na usinagem em baixas velocidades de corte um desempenho satisfatório do óleo de canola, evidenciando sua boa capacidade lubrificante, enquanto para usinagem a altas velocidades de corte o óleo de algodão teve um melhor desempenho, evidenciando a sua boa capacidade refrigerante.

- De um modo geral, em todo processo de fresamento frontal do aço ABNT 1045 laminado e para todas as condições de corte testadas, o método de destruição da ferramenta de corte

predominante foi, trincas de origem térmica, com presença de desgaste adesivo (*attrition*) e lascamentos.

- Observando-se todos os resultados obtidos, percebe-se um grande potencial nos óleos comestíveis vegetais a base de canola e a base de algodão, considerando que os mesmos foram submetidos somente a um processo de extração e degomagem com refinamento industrial, mas demonstrando razoáveis resultados em sistemas de microlubrificação.

CAPÍTULO VI

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas sugestões e propostas de atividades de pesquisa que podem enriquecer e dar continuidade ao trabalho desenvolvido até o momento.

- Modificação estrutural dos óleos vegetais aplicados nesta pesquisa, principalmente os óleos a base de algodão e a base de canola com inserção de aditivos específicos que possam vir a melhorar o desempenho dos mesmos.
- Realização de outros ensaios de fresamento utilizando-se a técnica MQF, variando-se o material de corte, as condições de corte e a ferramenta/inserto, monitorando os resultados dos mesmos, a fim de comparação com os resultados desta pesquisa.
- Focar uma investigação na tribologia do processo, com detalhe na interface cavaco - ferramenta, para identificar as reais modificações que os fluidos vegetais proporcionam durante o corte de materiais.
- Projeto de desenvolvimento de sistemas de exaustão em máquinas ferramentas como forma de eliminar do ambiente a névoa e a fumaça de óleo gerada durante o uso da técnica da mínima quantidade de fluido (MQF) na usinagem que podem ser considerados subprodutos indesejáveis, pois contribuem para aumentar o índice de poluentes em suspensão do ar, causando problemas de saúde ocupacional e danos ao ambiente.

CAPÍTULO VII

7. REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, O. L.; VILELLA, R. C.; BUTTON, S. T. 2004. **Processos de Fabricação e Planejamento de Processos**. 2ª ed. Campinas, UNICAMP, Processos Produtivos em Engenharia de Produção – Usinagem.

ALVES, S. M.; OLIVIERA, J. F. G. **Development of new cutting fluid for gridding process adjusting mechanical performance and environmental impact**. Journal of Material Processing Technology. São Paulo, 2006.

AMORIM, HERALDO. (2003). **Fresamento - 2ª Parte. Notas de aula**. DEMEC; Universidade Federal Do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

ANEZIRIS, C. G.; HOMOLA, F. **High temperature wettability of refractories in contact with melts**, Handbook, German Ceram. Soc. Technical Ceramic Materials, Kriegesmann, Cap. 5.4.2.1 (2005) 1-32.

ARAÚJO, J. M. A. **Química de Alimentos: teoria e prática**. 2. ed. Viçosa: UFV, 1999. 416p.

ASADAUSKAS, S.; ERHAN, S. Z. **Lubrificant base stocks from vegetable oil. Industrial crops and products**. v. 11, n. 2-3, p. 277-282, 2000.

ASM Handbook, Volume 16, **Machining**, ASM International, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6405, 1988, **Rugosidade das Superfícies**, Norma Brasileira Registrada, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8404, 1984, **Indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos**, Norma Brasileira Registrada, Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR ISO 9000/2000 - **Sistema de Gestão da Qualidade: Fundamentos e Vocabulário**. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14004 - **Sistema de gestão ambiental**: diretrizes gerais sobre princípios, sistemas e técnicas de apoio. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 32p.

ATTANASIO, A. et al. *Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear*. Wear. Elsevier B. V. Italy, Abr 2005.

BARADIE, M. A. **Cutting fluids: Part I - Characterization**. Journal of Material Processing Technology 56, 786-797. Dublin, 1996.

BARADIE, M. A. El. **Cutting fluids: Part II. Recycling and clean machining**. Journal of Materials Processing Technology, Irlanda, 1996.

BATISTA, E.; MONNERAT, S.; KATO, K. **Liquid-Liquid Equilibrium for Systems of Canola Oil, Oleic Acid, and Short – Chain Alcohols**. J. Chem. Eng. Data, v.44, n.6, 1999.

BIANCHI, E. C. **Aplicação e utilização dos fluidos de corte nos processos retificação**. Editora Artliber, Engenharia Mecânica, 112 pags. Edição 2004.

BOHES, L.; BORGES, R.; NETO, E. D. S. 1994, **Fresamento de Superligas Constituídas de Alta Percentagem de Níquel e Outros Elementos**, VI Congresso Nacional de Ingenieria Mecânica, Chile, pp. 365-370.

BONDILOLI, P. **Crambe Abyssinica oil and its derivatives as Renewable Lubricants: Synthesis and Characterization of Different Esters based on crambe fatty acids**, J. Synthetic Lubrication, 2003.

BRAGA, D.; ANSELMO, D.; MIRANDA, G.; COPPINI, N. **Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloy**; Journal of Materials Processing Technology; 122; 127-138; 2002.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução RDC nº482, de 23 de setembro de 1999. Aprova o Regulamento Técnico: **Fixação de Identidade e Qualidade de Óleos e Gorduras Vegetais**.

BYRNE, G.; SCHOLTA, E. (1993). **Environmentally clean machining processes – a strategic approach**. CIRP Annalen, Paris, v.42, n.1, p.471-474.

CAMPANELLA, A. **Lubricants from chemically modified vegetable oils**. Bioresource Technology v. 101, n. 1, p. 245-254, 2010.

CAPELLETTI, R. V. **Avaliação da atividade de biocidas em biofilmes formados a partir**

CATAI, R. E. **Otimização das condições de refrigeração/lubrificação no processo de retificação cilíndrica de mergulho**. 2004. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2004.

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA LIMPA (CNTL/SENAI/RS). **Resíduos Perigosos**. Informativo CNTL/SENAI. Ano 7 nº 53. Junho / julho, 2008.

CHANDRASEKARAN, H.; THOORS, H. 1994. **Tribology in Interrupted Machining: Role of Interruption Cycle and Work Material**, Wear, 179, pp. 83-88.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica – Materiais de Construção Mecânica - Volume II**. 2. Ed. São Paulo-SP: MacGraw-Hill, 1986.

CIMM. Material Didático: **Usinagem, Fluidos de Corte e Meio Ambiente**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/materialdidatico/usinagem.shtml>. Acesso em: 20 set. 2009.

CLARENS, A. F.; ZIMMERMAN, J. B.; KEOLEIAN, G. A.; HAYES, K.F.; SKERLOS, S.J. 2008. **Comparison of life cycle emissions and energy consumption for environmentally adapted metalworking fluid systems**. Environmental Science & Technology. 42, 8534-8540.

COELHO, R. S. **Avaliação da toxicidade de fluidos de usinagem através da ecotoxicologia aquática**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

COLOMBARI, R. R. **Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção**. Dissertação de mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2004.

CUTTING TOOL ENGINEERING Magazine, SME, Fev. 2005.

de fluido de corte utilizado na usinagem de metais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química. Universidade de Campinas. Campinas, 2006.

De MELO, A. C. A., 2001, **Estudo das Trincas de Origem Térmica Geradas em Ferramentas de Metal Duro durante o Fresamento Frontal**, Tese de Doutorado, Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica, FEMEC - UFU, Uberlândia - MG.

De MELO, A. C. A.; MACHADO, A. R.; LIMA & SILVA, S. M. M.; GUIMARÃES, G. **Estudo da Variação da Temperatura de Corte no Fresamento Frontal**, 2º COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia - MG, 2003.

De MELO, A. C. A.; MILAN, J. C. G.; Da SILVA, M. B.; MACHADO, A. R.; **Some Observation on Wear and Damages in Cemented Carbide Tools**, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering, vol. XXVIII, Nº 3, July - September, 2006.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. (2006). **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 6. Ed. São Paulo: Artliber Editora, 6. 244p.

DÖRR, J. **New perspectives in dry machining**. In: 4º Seminário Internacional de Alta Tecnologia – Inovações Tecnológicas na Manufatura para o Ano de 2000, Piracicaba, São Paulo, UNIMEP, 1999.

DROZDA, T.; WICK, C.; BENEDICT, J. T.; VEILLEUX, R. F.; BAKERJIAN, R. (1983), Society of Manufacturing Engineers; **Tool and Manufacturing Engineers Handbook: Machining**, Society of Manufacturing Engineers, ISBN 978-0-87263-085-7.

DUMONT, M. J. e NARINE, S. S. **Soapstock and deodorizer distillates from North American vegetable oils: Review on their characterization, extraction and utilization**. Food Research International, v.40, n.8, p. 957-74, 2007.

EISENTRAEGER, A.; SCHMIDT, M., MURRENHOFF, H., DOTT, W.; HAHN, S. **Biodegradability testing of synthetic ester lubricants – effects of additives and usage**. Chemosphere 48, 89–96. Germany. 2002.

ERHAN, S. Z.; SHARMA, B. K.; PEREZ, J. M. **Oxidation and low temperature stability of vegetable oil-based lubricants**. Industrial Crops and Products, v. 24, n. 7, 2006.

FARIA A. A.; LELES, M. I. G.; IONASHIRO, M. **Estudo da Estabilidade Térmica de Óleos e Gorduras Vegetais por TG/DTG e DTA**. Ecl. Quím, São Paulo, v. 27, p. 111-119, 2002.

FERNANDES, U. B. **Análise de métodos de lubrificação aplicados no processo de retificação cilíndrica interna de mergulho em aços endurecidos**, tese de doutorado, UNESP (2007).

FERRARESSI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, Ed. Edgard Blucher, 1977.

FILHO, J. C. (1998). **Estudo e Monitoramento do Processo de Fresamento Frontal com Fresas de Insertos Intercambiáveis**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

FRANCO, S. D., 1989, **Contribuição ao Estudo do Desgaste Abrasivo de Materiais Polifásicos**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, MG, Brasil, 115 p.

GONZALES, G. S.; CUPINI, N. L. **Aspectos Metalúrgicos na Avaliação da Usinabilidade do Aço SAE 12L14 Submetido a Crescentes Graus de Encruamento por Trefilação**. In: 47º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, 1992.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing**. Materials, processes, and systems. New Jersey: Ed. John Wiley & Sons, 2002

GUENZA, J. E. **Análises do Desempenho do Fresamento em Altas Velocidades de Corte do Ferro Fundido GG25 em Aplicação Industrial**, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 134 p. 2008.

HADIAN, A. M.; DREW, A. L. **Thermodynamic modeling of wetting at silicon nitride/Ni-Cr-Si alloy interfaces**, Mater. Sci. Eng. A189 (1994) 209-217.

HELLÍN, L.C.; CLAUSELL, M. P.R. **Incidência de la Fritura em La Composición de La Fracción Lipídica de diversos aperitivos de consumo generalizado em nuestro Pais**. Anal. Bromatol., v.36, n.1, p.5 – 31, 1984.

HOLINK A.S.; KAMBOUR R.P.; FINK D.G.; HOBBS .Y. **Microstructural science**, v.7, 1979.

HWANG, H.; ERHAN, S. Z. 2006. **Synthetic lubricant base stocks from epoxidized soybean oil and guerbet alcohols**. Industrial Crops and Products. 23:313-317.

IGNÁCIO, E. A. **Caracterização da legislação ambiental voltada para a utilização de fluidos de corte na indústria metal-mecânica**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Faculdade de Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. 1996. **Fundamentals Heating Mass Transfer**, Ed. John Wiley & Sons, 4th.Edition.

INTERLOY, 1045. www.interloy.com.au/data_sheets/carbon_steels/1045. 2009

INTERNATIONAL STANDARD.ISO 8688-1- **Tool life testing in milling**. Part 1: **Face milling**. First edition. 1989 – 05 – 01.

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

KLOCKE, F.; SCHULZ, A.; GERSCHWILER, K.; REHSE, M. 1998, **clean manufacturing technologies – The competitive edge of tomorrow? The International Journal of Manufacturing Science & Production**, v.1, n.2, p. 77-86.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida – parte 1**. Traduzido e adaptado por Rolf Bertrand Schroeter e Walter Lindolfo Weingaertner do livro “Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen”. 1997.)

KOWALSKI, B. **Evaluation of the Stability of Some Antioxidants for Fat- Based Foods**. Thermochemica Acta, Warsaw, v.177, p. 9-14, may. 1990.

KURODA, M. **Aumentando a lucratividade com óleos vegetais**, O Mundo da Usinagem, 3ª. Edição, pp. 14-15, 2006.

LEHNINGER, A.; NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de Bioquímica**, 5. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2011.

MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M; DA SILVA, M. B. 2011, **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2ª edição. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 384 p.

MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M; DA SILVA, M. B., 2009, **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 384 p.

MACHADO, A. R.; Diniz, A. E. 2000. **Corte a Seco, com Mínima Quantidade de Fluido e com Fluido em Abundância: Usos, Aplicações, Vantagens e Desvantagens**, Anais da Usinagem 2000 Feira e Congresso, São Paulo, Brasil, 18p.

METAL'S HANDBOOK. **Machining**. Estados Unidos: ASM International, 1989. Volume 16. 944p. ISBN 10: 0-87170-022-0. ISBN 13: 978-0-87170-022-3.

MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4ª ed., Ltc, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

MORETTO, E; FETT, R. **Tecnologia de Óleos e Gorduras Vegetais**. São Paulo: Varela, 1998. 150p.

OHSAS. 18001:2007. **Occupational Health and Safety Management Systems. Requirements**. OHSAS, 2007.

OLIVEIRA, J. F. G.; ALVES, S. M. **Adequação ambiental dos processos de usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental.** *Jornal Produção*, v. 17, n. 1, p. 129-138, 2007.

OLIVEIRA, J. F. G.; ALVES, S. M. **Novos fluidos de corte adequados ao desempenho mecânico da retificadora e ao meio ambiente.** *Revista Máquinas e Metais*, p. 28-43 jan. 2006.

OLIVEIRA, J. T. G. S. B. **Melhor Dose e Dose Econômica de TBHQ em Óleos de Milho e Canola.** Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em ciência pela ESALQ/USP, Piracicaba, 2003.

PAUL, S.; MITTAL, G. S.; **Crit. Rev. Food Sci. Nutr.** 1997, 37, 635.

PAWLAK, Z.; KLAMECKI, E. B.; RAUCKYTE, T.; SHPENKPV, P. G.; KOKOWSKI, A. **The Tribochemical and Micellar Aspects of Cutting Fluids,** *Tribology International*, 2004.

PETTERSON, A., 2007. **High-performance base fluids for environmentally adapted lubricants.** *Tribology International* 40, 638-645.

PIMENTEL, M. F.; PRADO, E. L.; MIYADA, K. **Avaliação da Usinabilidade dos Aços de Corte Fácil Através da Elaboração de Curvas de Usinabilidade (Curvas de Taylor) com Uso de Ferramentas de Corte de Aço Rápido.** In: 59º Congresso Anual da ABM International, 2004. São Paulo/SP.

POLLI, M. L. (2005); **Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

RAHMAN M.; KUMAR A S.; SALAM M. U. **Experimental Evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling;** *International Journal of Machine Tools and Manufacture*; 42; 539-547; 2007.

RICHETTI, A.; MACHADO, A. R.; DA SILVA, M.B.; EZUGWU, E.O.; BONNEY, J. **Influence of the number of inserts for tool life evaluation in face milling of steels,** *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44 (2004) 695-700.

ROLEMAR.COM / download / webcatalogo / vober.pdf

ROSSMORE, H.W. **Microbiology of metalworking fluids: deterioration, disease and disposal.** *Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers*.P.113-118, 1995.

ROSSMORE, H.W.; ROSSMOORE, L. A. **Factors affecting selection of metalworking fluid biocides**. Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers.P.23-28, 1995.

RUNGE, P. R. F.; DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas Indústrias – Produção, Manutenção e Controle**. Triboconcept – Edições Técnicas, p. 71-171, 1990.

SALES, W. F. **Determinação das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte**. Uberlândia, 1999. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

SALES, W. F.; DINIZ, A. E.; MACHADO, Á. R. **Application of cutting fluids in machining processes**. J. Braz. Soc. Mech. Sci., 2001, vol.23, no.2, p.227-240. ISSN 0100-7386.

SANDVIK COROMANT. **Catálogo técnico 2011 Sandvik Coromant**. 8ª ed. São Paulo: Elanders, 2011.

SCHEY, J. A. **Introduction to Manufacturing Processes**, McGraw-Hill Intl. Editions, 2a. edição, 1987.

SHASHIDHARA, Y.M.; JAYARAM, S.R. 2010. **Vegetable oils as a potential cutting fluid – an evolution**. Tribology International 43, 1073-1081.

SHAW, M.C. **Metal Cutting Principles**. Oxford series on advanced manufacturing. 1984.

SHENG, P. S.; OBERWALLENEY, S. **Life – cycle planning of cutting fluids – a review**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 119, n. 4 (b), p. 791-800. 1997.

SILLIMAN, J. D. **Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application**. Society of Manufacturing Engineers. 2ª edição, p. 1-47, 129-135, 187-191, 1992

SILVA, E. J. **Análise da influência dos tipos de fluido de corte e rebolo na retificação do aço SAE HVN-3**. Dissertação de Mestrado – UNESP, Bauru - SP, 2000, p. 35-44.

SILVA, E. J.; BIANCHI, E. C.; OLIVEIRA, J. F. G. **Uma contribuição para a determinação de procedimentos padrão para a seleção, aplicação, manutenção e descarte de diferentes tipos de fluidos de corte utilizados em retificação**. UNESP-BAURU-2005.

SISSOM, L. E.; PITTS, D. R. 1979, **"Fenômenos de Transporte"**, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, Brasil, 765p.

SMART, E. F. e TRENT, E. M. 1974, **Coolants and Cutting Tool Temperatures**.

SMITH, W. F. **Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. Ed. Lisboa: McGraw-Hill. 1998. 892p.

SOKOVIC, M.; MIJANOVIC, K. **Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes**. Journal of Materials Processing Technology 109, 181-189. Ljubljana, Slovenia. 2001.

STANFORD, M.; LISTER, P. M.; KIBBLE, K. A. **Investigation into the effect of cutting environment on tool life during the milling of a BS970-080A15 (En32b) low carbon steel**. Wear 262, 1496–1503. 2007.

SU. **Refrigerated cooling air cutting of difficult - to cut materials**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 47, n. 6, p. 927-933, 2007.

SUDA, S.; YOKOTA, H.; INASAKI, I.; WAKABAYASHI, T. **A synthetic ester as an optimal cutting fluid for minimal quantity lubrication machining**. 2002.

TAN, X. C. **A decision - making framework model of cutting fluid selection for green manufacturing and a case study**. Journal of Materials Processing Technology 129, 467-470. China. 2002.

TEIXEIRA FILHO, F. **A utilização de fluido de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5PH**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 2006.

TEIXEIRA, C. R. Entrevista, **Usinagem Ecológica**. Disponível em <<http://www.cimm.com.br>> Acesso em: 31 out 07.

TEIXEIRA, C. R.; SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. **Aspectos Ecológicos nos processos de Usinagem**. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br>>. 2005.

TESSLER, M. B.; BARBOSA, C. A. **A usinabilidade dos aços inoxidáveis**. *Metalurgia e Materiais - ABM*, v. 49, n. 413, p. 32-41, janeiro de 1993.

THEODORI, D.; SAFT, R.J.; KROP, H.; VAN BROEKHUIZEN, P. 2004. **Development of criteria for the award of the European Ecolabel to lubricants**. IVAM - Research and Consultancy on Sustainability, Amsterdam.

TLUSTY, J. 1984, **Dynamics of High Speed Milling**, the Winter Annual Meeting of ASME, New Orleans, Louisiana, USA, 9-14 December, pp. 101-126.

TOCCHETTO, M. R. L.; COUTINHO, H. L. **Curso de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais**. Edição Revisada. 2004.

TRENT, E. M. **Metal Cutting**, 2nd Ed, Butterworth, London, 1984. p.245.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4^a ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.

TRENT, E.M., 1991, **Metal Cutting**, 3rd Edition, Butterworths-Heinemann Ltd, 273 pg.

VIEIRA, F. C. V.; PIERRE, C. T.; CASTRO, H. F. **Influência da composição em ácidos graxos de diferentes óleos vegetais nas propriedades catalíticas de uma preparação comercial de lipase pancreática**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Anais. Campinas: UNICAMP, 2005.

VIEIRA, J. M.; MACHADO, A. R.; EZUGWU, E. O. **Performance of Cutting Fluids During Face Milling of Steels**. Journal of Materials Processing and Technology, Vol 116, 2001.

VOSS, J. **As especificações e a qualidade do biodiesel nacional. O biodiesel**. Curitiba, ano II, n. 14, set. de 2006.

WONNACOT, R.J e WONNACOT, T.H. 1985. **Fundamentos de Estatística**, Livros Técnicos e Científicos S.A.

WOODS, S. **Going green – vegetable oil-based metalworking fluids can provide better performance and environmental results than mineral oil-based fluids**, Cutting Tool Engineering Magazine, Volume 57, nº 2, February, pp. 47-53, 2005.

ZEILMANN, R. P. **Tendência aponta para a usinagem a seco**. NEI: Informação industrial atualizada e completa. Disponível em: < <http://www.nei.com.br/artigos> > 2011.

ZEMAN, A.; SPRENGEL, A.; NIEDERMEIR, D.; SPATH, M. **Biodegradable lubricants studies on thermo oxidation of metal-working fluids by differential scanning calorimetry**. Thermochim Acta, v. 268, p. 9-15, 1995.

CAPÍTULO VIII

8. APÊNDICES

8.1. Apêndice A (gráfico do comportamento das forças máximas de corte)

Na primeira etapa deste trabalho, verificou-se o comportamento das forças máximas de corte ($F_{\text{máx}}$) com aplicação MQF dos óleos vegetais para todas as condições de usinagem, de acordo com o gráfico da Fig. 8.1.

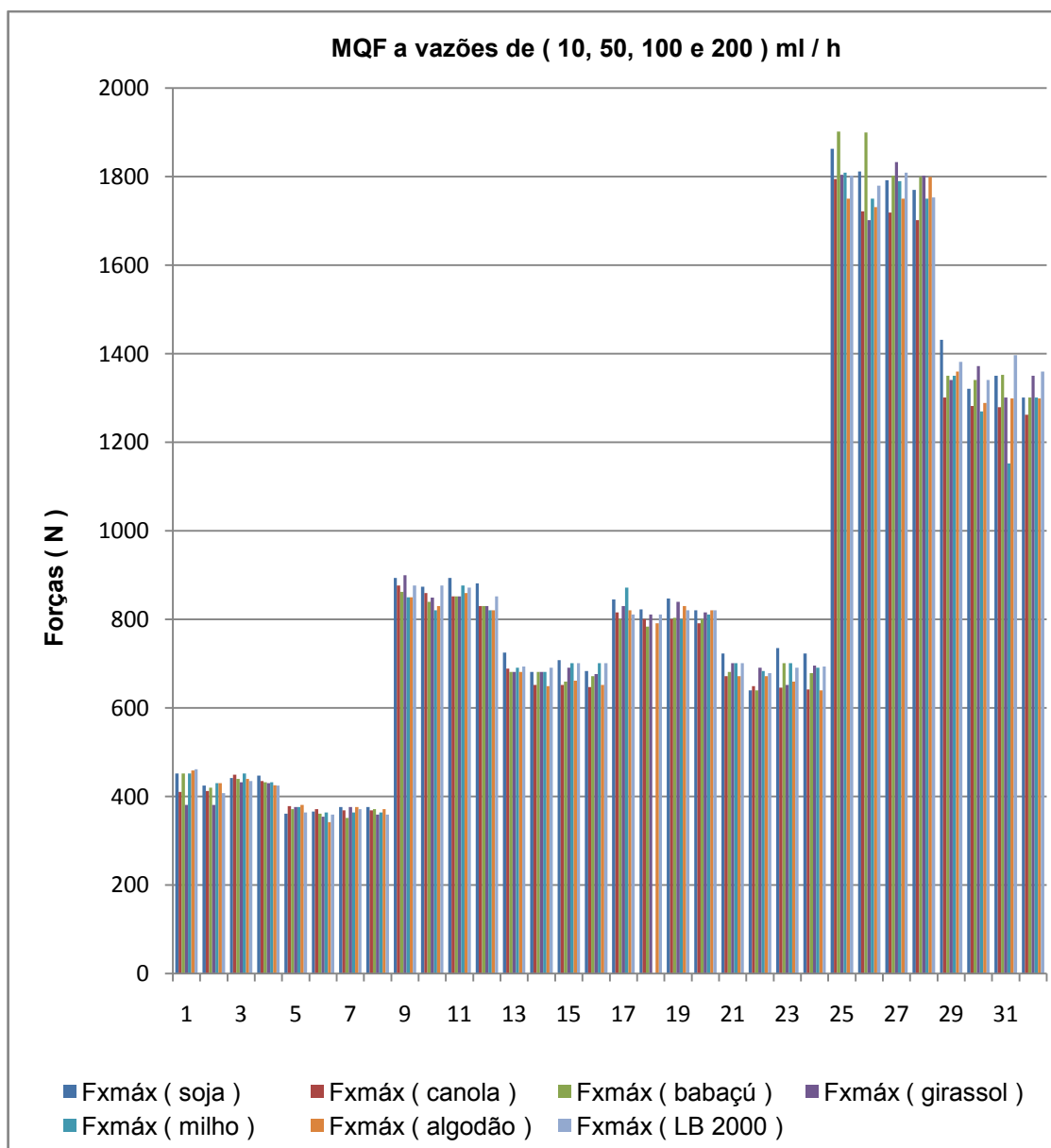


Figura 8.1. Comparação de desempenho entre óleos vegetais no critério força de corte.

8.2. Apêndice B (gráfico do comportamento das rugosidades médias)

Também na primeira etapa deste trabalho, verificou-se o comportamento do acabamento superficial através da rugosidade média (Ra) com aplicação MQF dos óleos vegetais para todas as condições de usinagem, de acordo com o gráfico da Fig. 8.2.

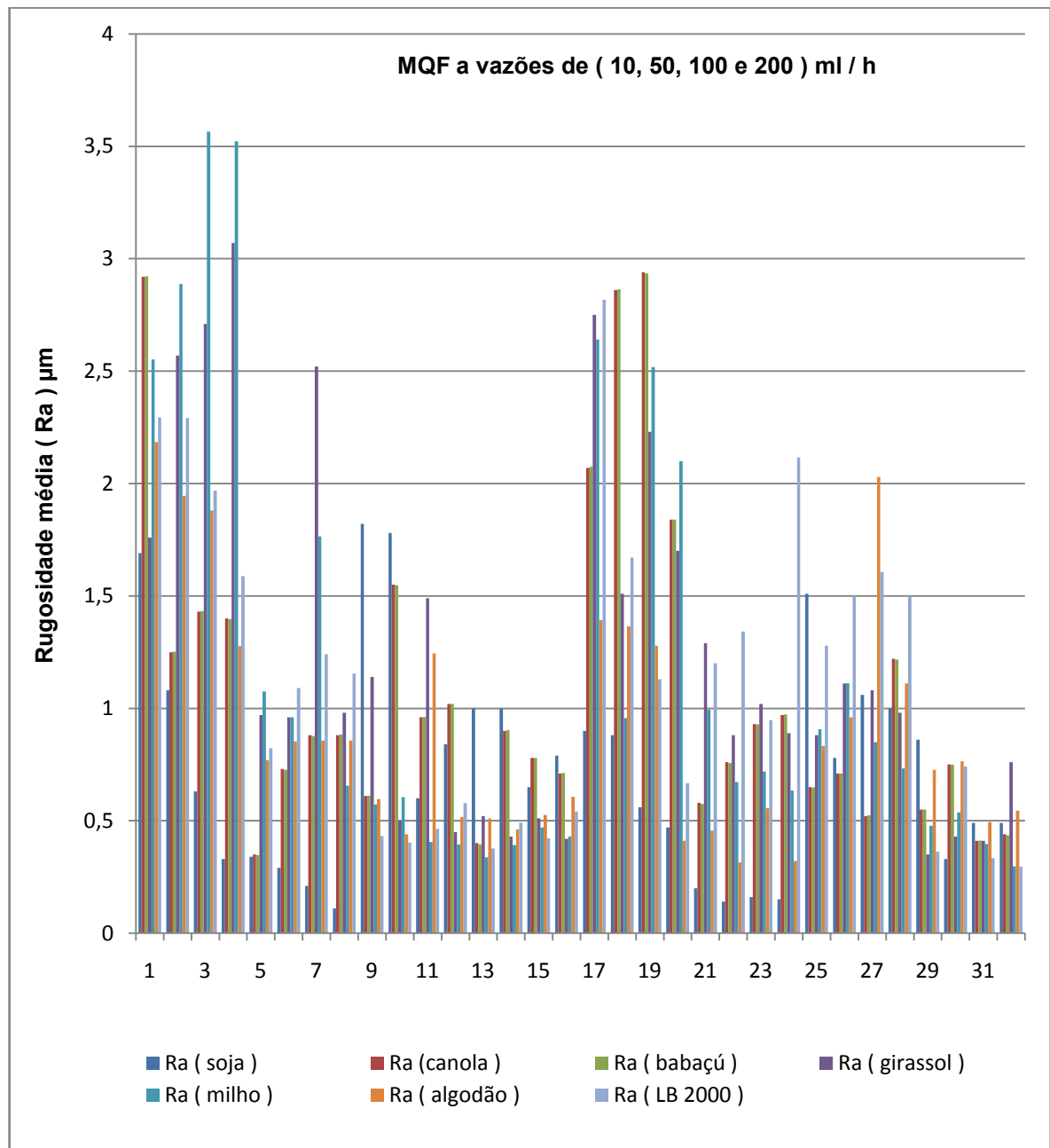


Figura 8.2. Comparação de desempenho entre óleos vegetais no critério rugosidade médias.

8.3. Apêndice C (imagens complementares dos testes de vida da ferramenta de corte)

Na segunda etapa deste trabalho, verificou-se o comportamento da ferramenta de corte através de quatro condições de usinagem, mensurando-se o desgaste médio de flanco ($VB_B = 0,35$ mm) e investigando os mecanismos de desgaste da mesma, com aplicação MQF dos óleos vegetais, de acordo com as Figs. 8.3 a 8.10.

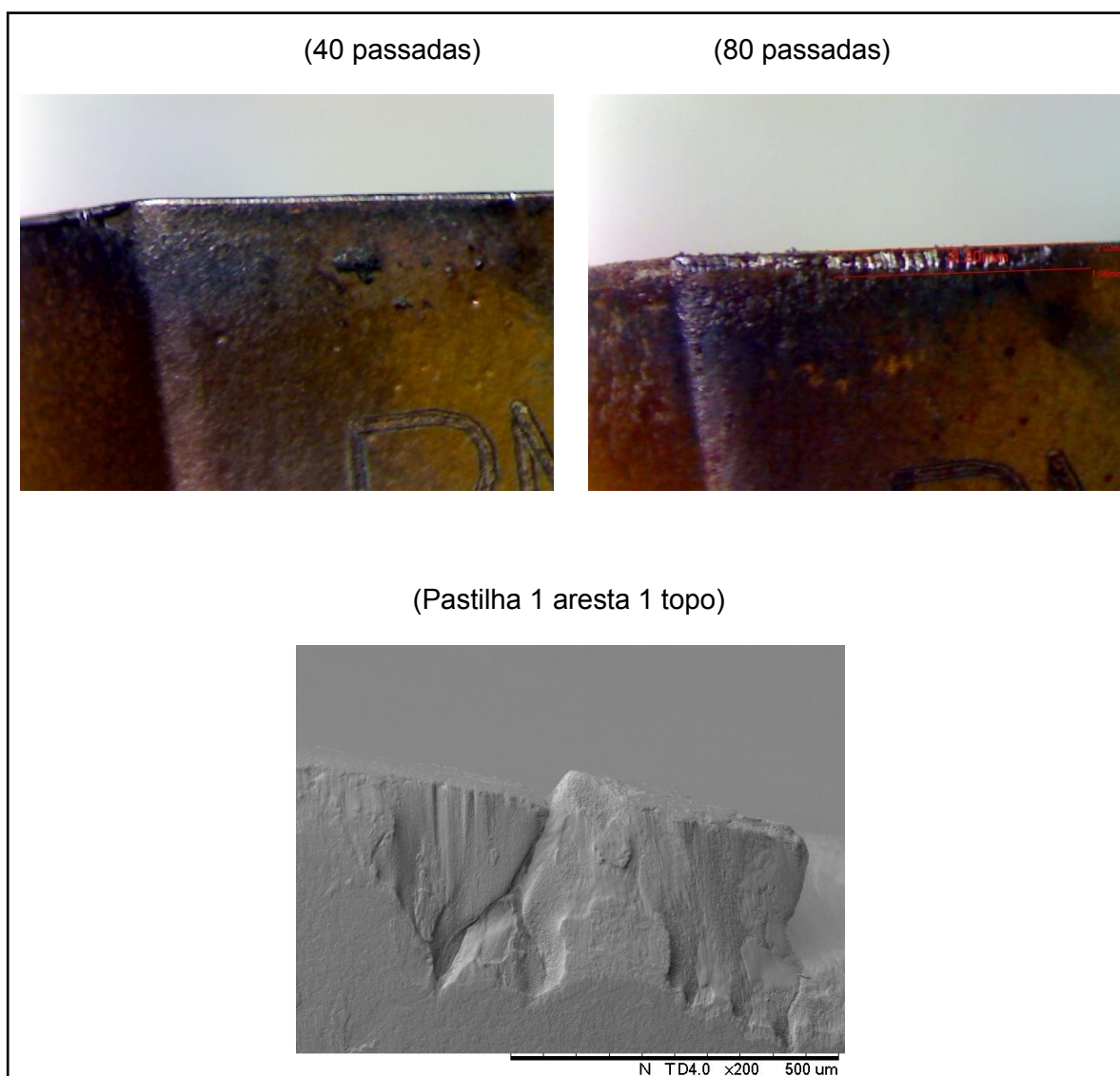


Figura 8.3. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: V_c : 210 m/min; f_z : 0,20 mm/rot; a_p : 2 mm; a seco.

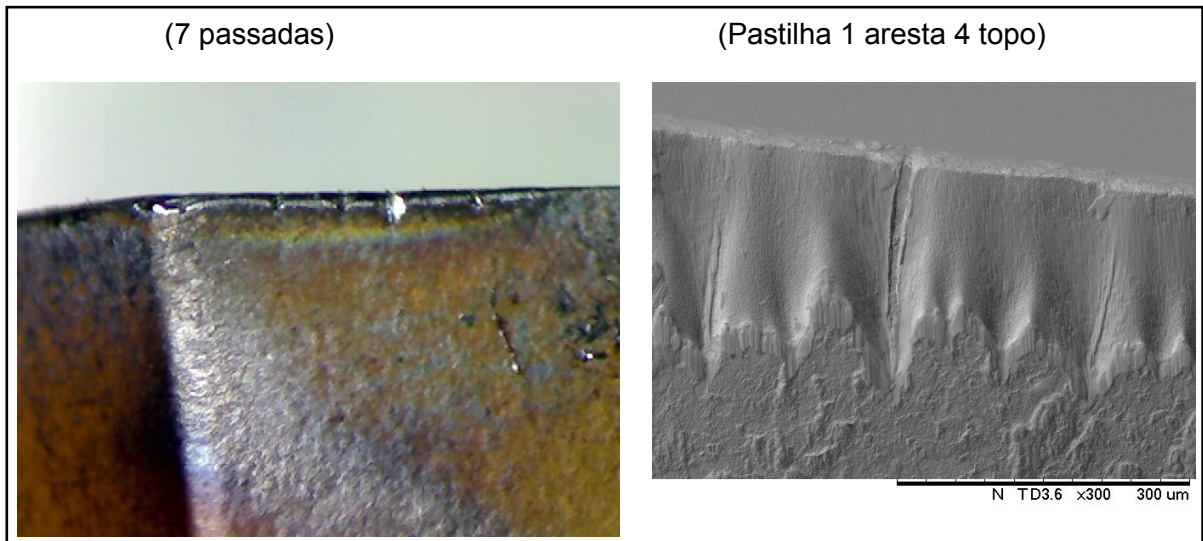


Figura 8.4. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: V_c : 450 m/min; f_z : 0,30 mm/rot; a_p : 2 mm; a seco.

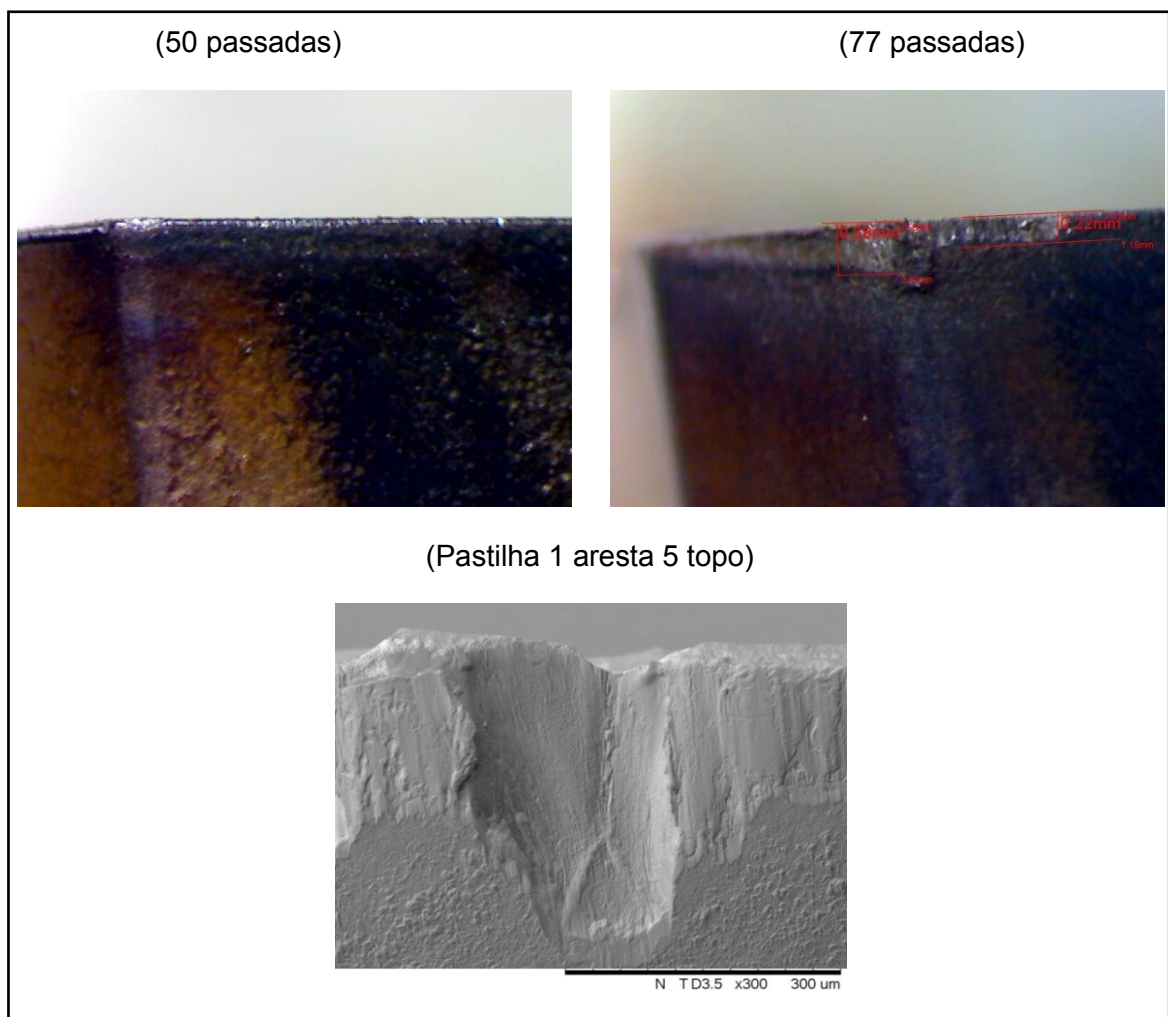


Figura 8.5. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: V_c : 210 m/min; f_z : 0,20 mm/rot; a_p : 2 mm; óleo de algodão.

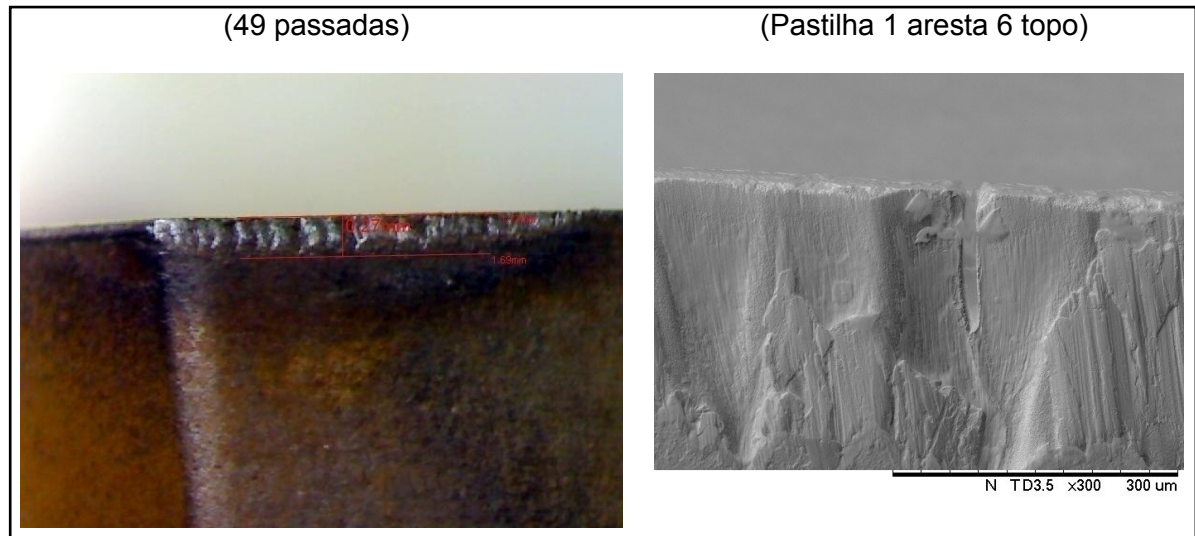


Figura 8.6. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: V_c : 450 m/min; f_z : 0,30 mm/rot; a_p : 2 mm; óleo de algodão.

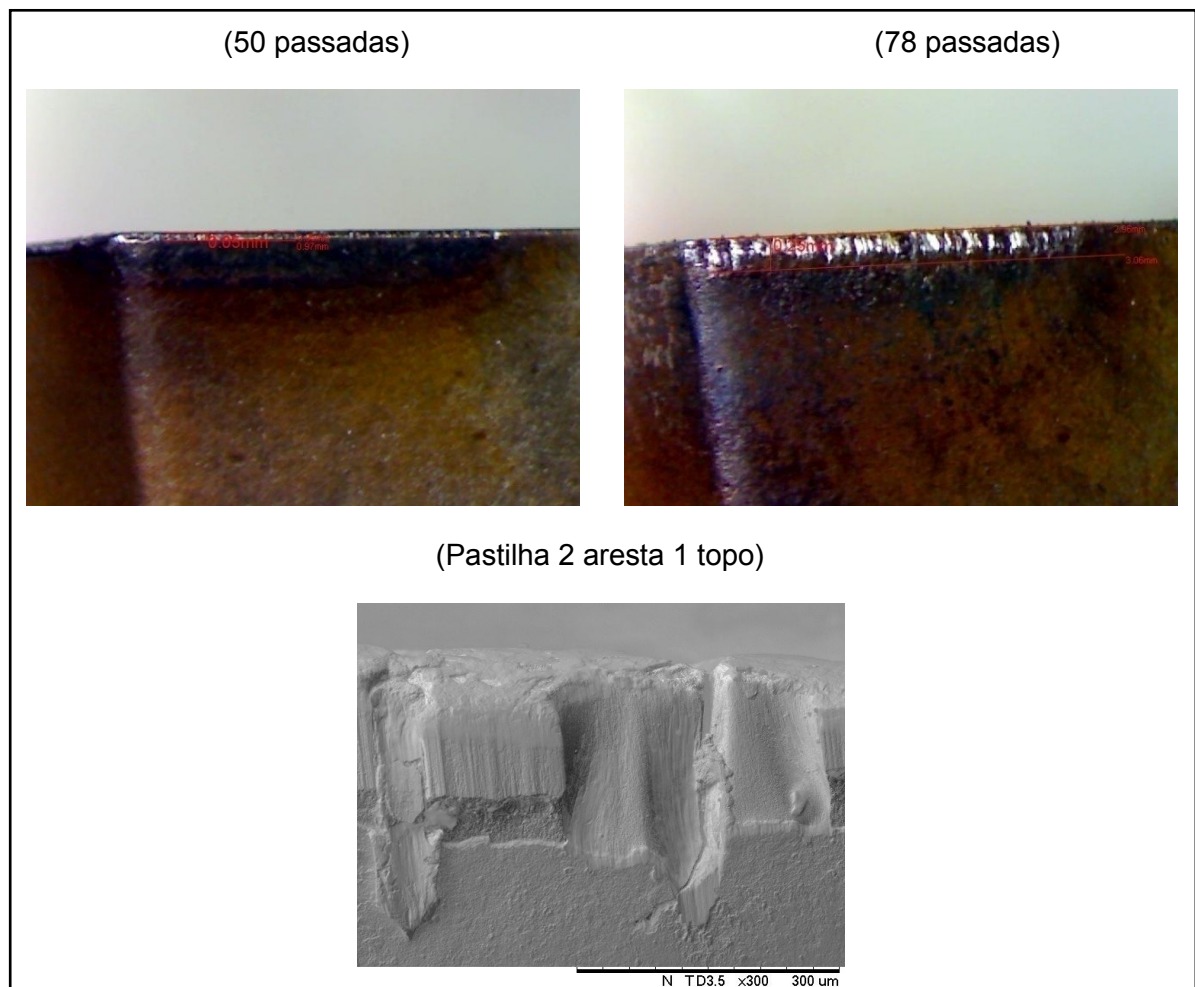


Figura 8.7. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: V_c : 210 m/min; f_z : 0,20 mm/rot; a_p : 2 mm; óleo de canola.

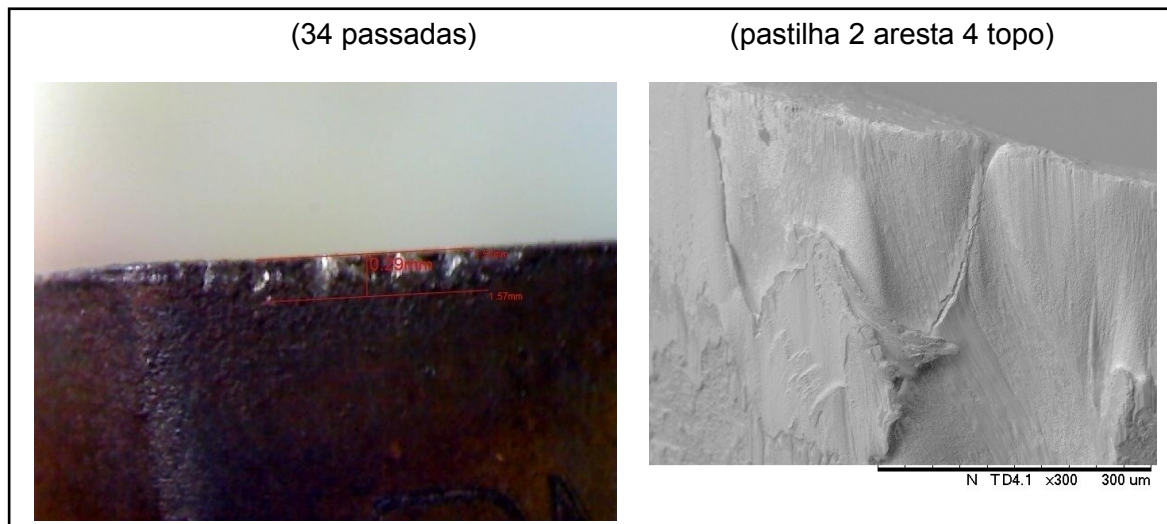


Figura 8.8. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: V_c : 450 m/min; f_z : 0,30 mm/rot; a_p : 2 mm; óleo de canola.

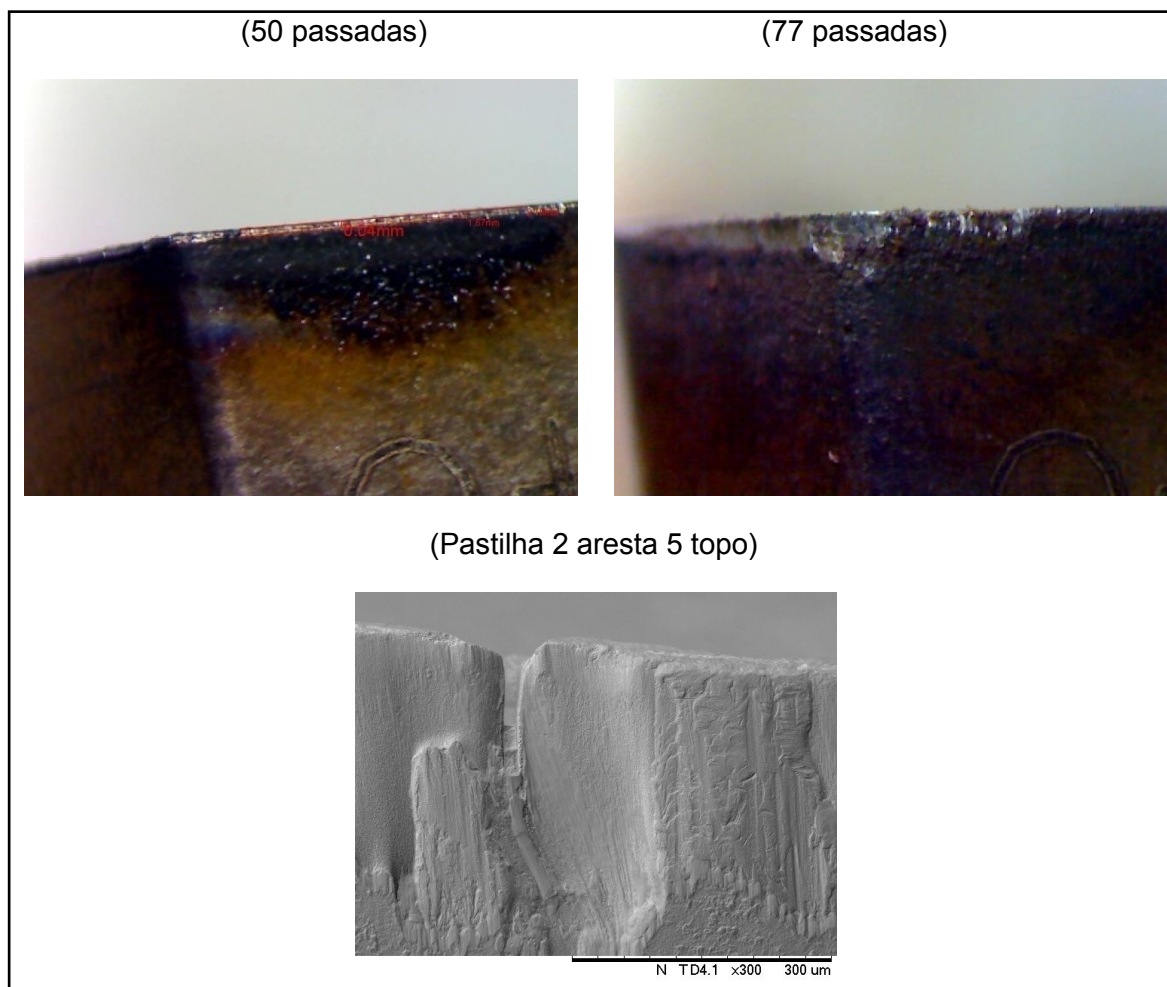


Figura 8.9. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: V_c : 210 m/min; f_z : 0,20 mm/rot; a_p : 2 mm; óleo LB 2000.

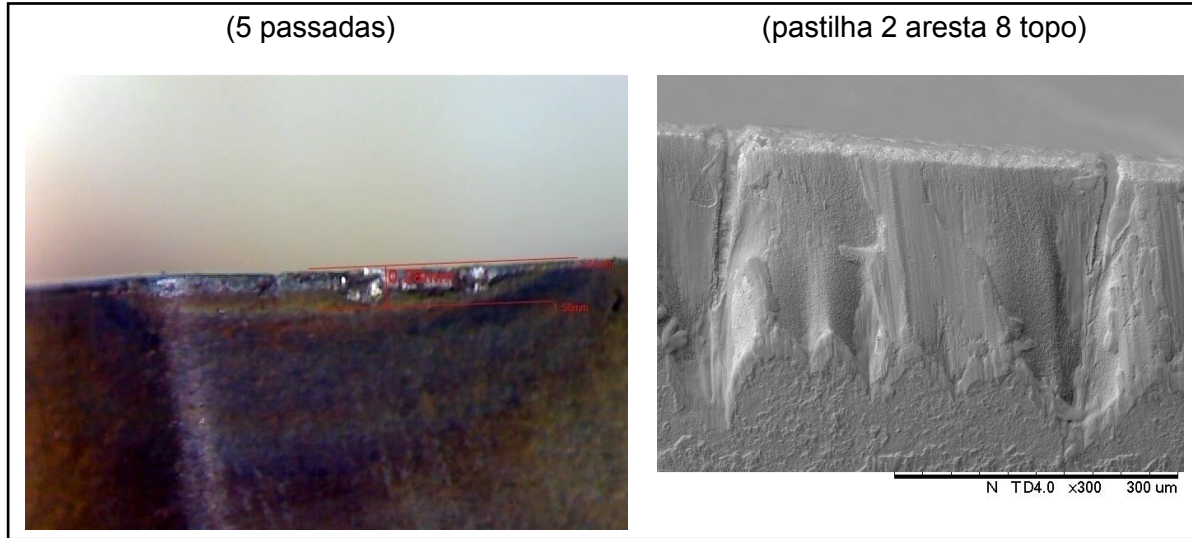


Figura 8.10. Desgaste médio de flanco (VB_B) de acordo com as condições de usinagem: V_c : 450 m/min; f_z : 0,30 mm/rot; a_p : 2 mm; óleo LB 2000.

8.4. Apêndice D (certificação do material pelo fabricante)

Como forma de comprovação do material utilizado na fabricação dos corpos de prova apresenta-se a certificação do fabricante do mesmo, conforme Figura 8.11.

 GERDAU ACOS ESPECIAIS PIRATINI		 ISO/TS 16949: 2002 Certificate Number: 38388		QUALITY CERTIFICATE MILL'S TEST CERTIFICATE CERTIFICADO DE CALIDAD		UNIFAL - UNIV. JOSEPH P. HENRIQUEZ Nº 497853										
NOTA FISCAL/INVOICE 106195	PESO/WEIGHT (kg) 20557,00	FEED CLIENTE/CUST. ORDER E-MAIL: 15.1	ORD. FORNEC./ORD. SUPPLY 13053574 - 807453106	QUALIDADE/GRADE SAE 1045	PRODUTO/PRODUCT BARRA LAMINADA REDONDA	LOTE/BATCH 84444800										
					SEM TRATAMENTO	CORRIDA/HEAT	12.333.576									
CLIENTE/CUSTOMER COMIL GERDAU CSS				BITOLA/SIZE (mm) 101,60	NORMA/SPECIFICATION PADRAO											
ANÁLISE QUÍMICA/CHEMICAL COMPOSITION																
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	Sn	Cu	Pb	Nb	N	Cu10Sn
0,48	0,26	0,66	0,023	0,017	0,16	0,05	0,02	0,002	0,002	0,013	0,009	0,10	0,001	0,001	0,0079	0,19
ENSAIOS MECÂNICOS/MECHANICAL PROP.																
DUREZA																
HB 205																
ENSAIOS METALOGRAFICOS/METALLOGRAPHIC TESTS																
T.GRÃO AUSTENÍTICO ASTM 7																
MICROINCLUSÕES/INCLUSION RATING NUMBERS																
AF	AG	BF	BG	CF	CG	DF	DG									
ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM									
2,0	1,0	0	0	0	0	1,0	0									
OBSERVAÇÕES/OBSERVATIONS Ultrassom aprovado.						DEPARTAMENTO DA QUALIDADE/QUALITY DEPARTMENT CHARQUEADAS, 12.03.2010  Ildo Jânio Souza de Oliveira - CREA 117203										

Figura 8.11. Certificação do material aço SAE 1045 (GERDAU, 2011).

8.5. Apêndice E (matriz de planejamento geral dos ensaios de forças, potência, vibração e rugosidades)

Esta matriz representa todos os ensaios de usinagem realizados conforme planejamento fatorial 2^4 , variando-se a velocidade de corte (V_c), o avanço (f_z), a profundidade de corte (a_p) e a condição lubrificante. Obtendo-se como respostas do processo, as forças de usinagem, a potência de corte, as rugosidades médias e máximas e vibração na forma de aceleração.

Tabela 8.1. Matriz de planejamento para os testes específicos de força e potência de corte, rugosidade e vibração - 1ª Etapa.

Variáveis de Entrada ou Fatores de Entrada					Variáveis de Saída ou Respostas do Processo							
- Material da peça: Aço ABNT 1045; - Ferramenta de corte: Fresa frontal (Coromil 345, Ø = 80 mm), com 6 insertos de metal duro revestidos (PM 4240) da Sandvik - Coromant; - Penetração de trabalho (a_e): 62 mm												
Experimentos	Condições de corte				Vazão (MQF) ml/h	Forças de corte N			Potência de corte KW	Rugosidade µm		Vibração mm/s ²
	Vc m/min	fz mm/rot	ap mm	Fluido de corte		F _x	F _y	F _z		Ra	Ry	
01	165	0,15	1	Seco / Emulsão	-----							
02	210	0,15	1	Seco / Emulsão	-----							
03	165	0,30	1	Seco / Emulsão	-----							
04	210	0,30	1	Seco / Emulsão	-----							
05	165	0,15	2	Seco / Emulsão	-----							
06	210	0,15	2	Seco / Emulsão	-----							
07	165	0,30	2	Seco / Emulsão	-----							
08	210	0,30	2	Seco / Emulsão	-----							

09	165	0,15	1	Fluidos Vegetais	10							
					50							
					100							
					200							
10	210	0,15	1	Fluidos Vegetais	10							
					50							
					100							
					200							
11	165	0,30	1	Fluidos Vegetais	10							
					50							
					100							
					200							
12	210	0,30	1	Fluidos Vegetais	10							
					50							
					100							
					200							
13	165	0,15	2	Fluidos Vegetais	10							
					50							
					100							
					200							
14	210	0,15	2	Fluidos Vegetais	10							
					50							
					100							
					200							
15	165	0,30	2	Fluidos Vegetais	10							
					50							
					100							
					200							
16	210	0,30	2	Fluidos Vegetais	10							
					50							
					100							
					200							

8.6. Apêndice F (programas CNC para fresamento frontal)

Para as etapas de determinação dos esforços de usinagem e vida da ferramenta de corte, pelo processo de fresamento frontal, foram elaborados dois programas CNC e inseridos na memória da máquina ferramenta, conforme Tabela 8.2.

Tabela 8.2. Programas CNC para forças de usinagem e vida da ferramenta de corte.

PROGRAMA CNC (FORÇAS DE USINAGEM)		PROGRAMA CNC (VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE)	
N 1Ø	G17 G71 G9Ø G94	N 1Ø	G17 G71 G9Ø G94
N 2Ø	G53 GØ Z -11Ø DØ	N 2Ø	G53 GØ Z -11Ø DØ
N 3Ø	T9; Fresa de Facear	N 3Ø	T9; Fresa de Facear
N 4Ø	M6; Troca de Ferramenta	N 4Ø	M6; Troca de Ferramenta
N 5Ø	G54 S836 M3 D1	N 5Ø	G54 S1792 M3 D1
N 6Ø	G1 XØ YØ Z1Ø F3000	N 6Ø	G1 XØ YØ ZØ F3ØØØ
N 7Ø	Z -1	N 7Ø	INICIO:
N 8Ø	Y233 F251	N 8Ø	G1 Z= IC (-1) F538
N 9Ø	Y125 F251	N 9Ø	G41
N 1ØØ	Z1Ø F3000	N 1ØØ	X -37Ø
N 11Ø	M3Ø	N 11Ø	G4Ø
		N 12Ø	GØ XØ
		N 13Ø	TERMINO:
		N 14Ø	REPEAT INICIO TERMINO P4
		N 15Ø	Z11Ø F3ØØØ
		N 16Ø	M3Ø