

TIAGO DO ESPIRITO SANTO BALDEZ NEVES

**INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO
DE ÓLEOS VEGETAIS COMESTÍVEIS COMO FLUIDO
DE CORTE NO PROCESSO DE FURAÇÃO DO AÇO
ABNT 1045**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2013**

TIAGO DO ESPIRITO SANTO BALDEZ NEVES

**INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE ÓLEOS
VEGETAIS COMESTÍVEIS COMO FLUIDO DE CORTE NO
PROCESSO DE FURAÇÃO 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 Processo de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva
Co-orientador: Prof. Dr. Jean Robert Rodrigues

**UBERLÂNDIA – MG
2013**

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

N518i Neves, Tiago do Espírito Santo Baldez, 1956-

Investigação da influência da aplicação de óleos vegetais como fluido de corte no processo de furação do aço ABNT 1045 / Tiago do Espírito Santo Baldez Neves. – 2013.

209 f. : il.

Orientador: Profº. Dr. Marcio Bacci da Silva.

Co-orientador: Prfº. Dr. Jean Robert Rodrigues.

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Fluidos de corte. – Teses. 3. Óleos vegetais – Teses. 4. Aço – Teses. I. Silva, Marcio Bacci da. 1964. II. Rodrigues, Jean Robert. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

TIAGO DO ESPIRITO SANTO BALDEZ NEVES

**INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE ÓLEOS
VEGETAIS COMESTÍVEIS COMO FLUIDO DE CORTE NO
PROCESSO DE FURAÇÃO DO AÇO ABNT 1045**

Tese APROVADA pelo Programa de Pós-graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal
de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de
Fabricação.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva FEMEC/ UFU

Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues IFMA

Prof. Dr. Álisson Rocha Machado FEMEC/ UFU

Prof. Dr. Éder Silva Costa FEMEC/ UFU

Prof. Dr. Júlio César Giubilei Milan UDESC

Prof. Dr. Salete Martins Alves UFRN

Uberlândia, junho de 2013

Aos meus pais, João Neves e Francisca Baldez, (*in memoriam*). Aos meus irmãos e irmãs. A minha esposa e companheira Iracy da Conceição Santos e aos meus filhos Anna Clara, Letícia Bianca e Tarcísio Marques, que souberam com amor e compreensão, dar força e incentivo nos momentos difíceis desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Uberlândia e a Faculdade de Engenharia Mecânica e ao Instituto Federa do Maranhão pela oportunidade de realizar esta qualificação profissional.

A DEUS, que sempre e em todos os momentos me protege e me abençoa.

A João Neves, Erivaldo Neves e a minha mãe Francisca Baldez (*in memorian*), como todos que em Cristo adormeceram com a bendita esperança da ressurreição, sempre estiveram ao meu lado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcio Bacci , Prof. Dr. Álisson Machado e ao Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues pelo apoio, atenção, ensinamentos, compreensão e orientação segura que nos levaram a concluir este trabalho.

Aos alunos de iniciação científica Nathan, Tiago, Ivanilson, Susy, Raynne e Igor pela convivência.

Ao Prof. Dr. Keyll Carlos pela oportunidade única e abençoada, dedicação, paciência e sacrifícios antes e durante a realização do DINTER.

Ao Prof. Dr. Antônio Ernandes pela colaboração e apoio na criação de software, aquisição de força, refrigeração entre outras contribuições indispensável na realização deste trabalho.

Ao Dr. Marcelo Mozinho, pelo auxílio nos cedendo microscópio **estereoscópio** binocular para obtenção das fotografias ou captura de imagens dos desgastes das brocas HSS.

Aos amigos e conterrâneos, Waldemir, Alfredo, Valter Meneses, Carmem, Roberta, Laécio, Remi, Bosco, Rubens Soeiro, André, pela colaboração, amizade e convivência, e em especial aos colegas Antônio Santos Araujo e Joaquim Teixeira, pela amizade, convivência, companheirismo, alegria e colaboração que contribuíram para inspiração e realização deste curso.

Ao Prof. Dr. Flavio Salgado Politi, pelos ensinamentos e orientações estatísticas.

Ao Prof. Dr. Mauro Araújo e a todos os colegas professores e servidores, em especial aos do DMM que contribuíram de alguma forma na realização desta qualificação profissional.

À CAPES/CNPQ pela oportunidade e apoio financeiro

A todos os funcionários e professores da UFU/IFMA que de alguma forma contribuíram na realização deste curso.

Amarás, pois, ao Senhor teu Deus de todo o teu coração, e de toda a tua alma, e de todo o teu entendimento, e de todas as tuas forças; este é o primeiro mandamento. E o segundo, semelhante a este, é: Amarás o teu próximo como a ti mesmo. Não há outro mandamento maior do que estes.

Marcos 12:30-31

NEVES, TIAGO DO ESPIRITO SANTO BALDEZ. **Investigação da Influência da Aplicação de Óleos Vegetais Comestíveis como Fluido de Corte no Processo de Furação do Aço ABNT 1045.** 2013. 209 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

Na usinagem, os fluidos de corte, quando escolhidos e aplicados apropriadamente, poderão refletir em benefícios durante os processos de fabricação. O método de aplicação do fluido selecionado deve permitir que o fluido de corte alcance o mais próximo possível da aresta de corte, lubrificando a interface cavaco/ferramenta. As propriedades do fluido são fundamentais para que ele facilite o processo de usinagem. No entanto, o fluido poderá representar grande problema para o meio ambiente e saúde do operador. Por este motivo, vários estudos de cunho científico e tecnológico são constantemente desenvolvidos para investigar o desempenho e alternativas para operações de usinagem. Uma das alternativas seria a utilização de um fluido menos agressivo ao operador e ao meio ambiente. Este trabalho estuda o efeito dos óleos vegetais (girassol, canola, soja, milho e babaçu) como fluidos de corte aplicados na forma Mínima Quantidade de Fluido – (MQF), nas forças de usinagem, torque e vida da ferramenta para o processo de furação do aço ABNT 1045, comparados com aplicação de fluido em abundância (jorro), utilizando-se o óleo sintético VONDER, usinagem a seco e óleo comercial LB2000 na forma MQF, para diferentes condições de corte. Foram variadas a velocidade de corte, o avanço e a profundidade do furo. Para utilização de análise estatística, foram utilizados dois níveis, para cada uma das variáveis de corte, com repetição. Os resultados expressam que o melhor desempenho foi do óleo de canola para avanços menores, e o de girassol para avanços maiores.

Palavras-chave: Fluidos de corte, Óleos vegetais, Furação, Aço ABNT 1045, Técnica MQF.

NEVES, T. do E. S. B. **Investigação da Influência da Aplicação de Óleos Vegetais Comestíveis como Fluido de Corte no Processo de Furação do Aço ABNT 1045.** 2013. 209 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

In machining processes, cutting fluids when properly chosen and applied, may reflect benefits for the manufacture of parts and components. The fluid properties are essential so that it facilitates the machining process and reach as close as possible to the cutting edge, lubricating the chip/tool interface. The fluid can be a major problem for the environment and health of the operator. For this reason, several scientific and technological studies are constantly developed to investigate the performance and environmentally friendly alternative to machining operations. This work studies the effect of vegetable oils (sunflower, canola, soybean, corn and babassu) as cutting fluids applied as MQF - minimal amount of fluid in the machining forces for the drilling process of ABNT 1045 carbon steel, compared with application of fluid in abundance (overhead cooling), dry machining and commercial oil LB2000 as MQF, for different cutting conditions. It was studied the effect of cutting speed, feed rate and length of the hole. At lower feed rates the best results were obtained with canola oil followed by sunflower at higher feed rates.

Keywords: Cutting fluids, vegetable oils, drilling, ABNT 1045 carbon steel, MQF technique.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	- Operações de usinagens no setor metal-mecânico.....	31
Figura 2.2	- Broca especial de 20 μm diâmetro.....	32
Figura 2.3	- Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo, na furação.....	34
Figura 2.4	- Constituintes de uma broca helicoidal.....	38
Figura 2.5	- Partes de uma broca helicoidal.....	40
Figura 2.6	- Defeitos geométricos nos furos.....	42
Figura 2.7	- Força versus a velocidade de corte do ferro, aço, cobre e latão.....	43
Figura 2.8	- Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgastes das ferramentas de corte.....	45
Figura 2.9	- Tipos de desgaste por abrasão em uma broca.....	47
Figura 2.10	- Desgaste de flanco em brocas helicoidais.....	48
Figura 2.11	- Formas de desgaste em brocas helicoidais.....	49
Figura 2.12	- Forças atuantes nas brocas helicoidais durante a usinagem.....	51
Figura 2.13	- Medição de forças com plataforma piezelétrica.....	54
Figura 2.14	- Diagrama das funções dos fluidos de corte.....	56
Figura 2.15	- Direções possíveis de aplicação do fluido de corte.....	60
Figura 2.16	- Lubricidade dos óleos vegetais e dos óleos minerais.....	64
Figura 2.17	- Ângulo de contato ou ângulo de molhabilidade.....	73
Figura 3.1	- Fluxograma dos procedimentos para os testes experimentais.....	76
Figura 3.2	- Esquema para aquisição de dados no ensaio de refrigeração.....	77
Figura 3.3	- (a) máquina de pendulo, (b) amostras de aço, (c) balança de precisão.....	78
Figura 3.4	- Esquema de aquisição da viscosidade dos óleos.....	79

Figura 3.5	- (a) 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. (b) Amostras embutidas em baquelite prontas para serem lixadas e polidas.....	80
Figura 3.6	- Microestrutura da seção 1 transversal. Ataque Nital à 2%, (a) 50 μ m (b) 10 μ m.....	81
Figura 3.7	- Microestrutura da seção 2. Ataque Nital à 2%, (a) 50 μ m (b) 10 μ m.....	81
Figura 3.8	- Dimensões dos corpos de prova.....	82
Figura 3.9	- Broca para metal HSS-G de 10 mm de diâmetro sem revestimento, DIN 338, C1 = 87 mm, C2 = 133 mm e D = 10 mm.....	82
Figura 3.10	- Centro de usinagem vertical, Discovery 560, ROMI.....	83
Figura 3.11	- Aparelho pulverizador para aplicação do MQF.....	84
Figura 3.12	- Microscópio triocular para monitoramento do desgaste.....	85
Figura 3.13	- Dispositivo do sistema para aquisição de força e torque.....	86
Figura 3.14	- Detalhe do sistema para aquisição de força e torque.....	86
Figura 4.1	- Gráfico da variação do ângulo de contato no decorrer do tempo dos óleos vegetais, LB2000 e óleo solúvel.....	90
Figura 4.2	- Ângulo de contato 60 segundos após o contato inicial da gota na superfície.....	90
Figura 4.3.	- Gráfica da temperatura em função do tempo dos óleos vegetais e a seco.....	91
Figura 4.4	- gráfico da energia específica média consumida em amostras aço ABNT 1045 submersas em fluidos de corte....	92
Figura 4.5	- Resultados da viscosidade dos fluidos utilizados.....	94
Figura 4.6	- Gráfico da média da força Fz e desvio padrão, para cada óleo, jorro e a seco, nos testes 1- 4, L=1,5 x D, Q=50 ml/h...	95

Figura 4.7	- Gráfico da média da força F_z e desvio padrão, para cada óleo, jorro e seco, nos testes 5 - 8, $L = 5 \times D$, $Q = 50 \text{ ml/h}$	96
Figura 4.8	- Diagrama de dispersão de crescimento para os dois primeiros tratamentos T_1 e T_2 para cada óleo em relação às forças de avanço.....	99
Figura 4.9	- Diagrama de dispersão de crescimento para os dois primeiros tratamentos T_3 e T_4 para cada óleo em relação às forças de avanço.....	99
Figura 4.10	- Gráfico dos resíduos padronizados da força de avanço para os testes, T_1 a T_4 (estimativa de erros).....	100
Figura 4.11	- Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T_1 a T_4 na furação, $L = 1,5 \times D$, $Q = 50 \text{ ml/h}$, do óleo comestível de canola.....	101
Figura 4.12	- Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T_5 a T_8 na furação $L = 5 \times D$, $Q = 50 \text{ ml/h}$, do óleo comestível de canola.....	102
Figura 4.13	- Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T_1 a T_4 na furação $L = 1,5 \times D$, $Q = 50 \text{ ml/h}$, a seco.....	102
Figura 4.14	- Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T_1 a T_4 na furação $L = 1,5 \times D$ e $L = 5 \times D$, a seco.....	103
Figura 4.15	- Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço F_z em função dos testes, (a) T_1 a T_4 , (b) T_5 a T_8 canola MQF, $Q=50 \text{ ml/h}$ x a seco.....	104
Figura 4.16	- Gráfico de tendências da força de avanço em função: (a) v_c , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.....	105
Figura 4.17	- Gráfico da força de avanço F_z em função do tempo, das condições T_1 a T_4 na furação $L = 1,5 \times D$, fluido vegetal comercial LB2000.....	106
Figura 4.18	- Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T_5 a T_8 na furação $L=5xD$, fluido vegetal comercial LB2000.....	106

Figura 4.19	- Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço F_z em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 canola MQF, $Q=50$ ml/h e LB2000.....	107
Figura 4.20	- Gráfico de tendência da força de avanço em função: (a) vc , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.....	108
Figura 4.21	- Gráfico da força F_z em função do tempo, das condições T1 a T4 na furação $L = 1,5 \times D$, fluido em abundância (jorro).....	109
Figura 4.22	- Gráfica da força (F_z) em função do tempo, das condições T5 a T8 na furação, $L = 5 \times D$, fluido em abundância (jorro)...	110
Figura 4.23	- Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço F_z em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 canola MQF, $Q=50$ ml/h e jorro.....	111
Figura 4.24	- Gráfico de tendências da força de avanço em função: (a) vc , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.....	112
Figura 4.25	- Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T1 a T4 na furação $L = 1,5 \times D$ girassol MQF, $Q = 50$ ml/h.....	113
Figura 4.26	- Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T5 a T8 na furação, $L = 5 \times D$, girassol MQF, vazão = 50 ml/h....	113
Figura 4.27	- Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço F_z em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 girassol MQF $Q=50$ ml/h e a seco.....	114
Figura 4.28	- Gráfico de tendências das estimativas de efeitos médios dos parâmetros de entrada (a) vc , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.....	115
Figura 4.29	- Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço F_z em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 girassol e LB2000, MQF, $Q = 50$ ml/h comparados na mesma condição.....	116
Figura 4.30	Gráfico de tendências da força de avanço em função: (a) vc , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.	117

Figura 4.31	Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço F_z em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 girassol MQF, $Q=50$ ml/h e fluido em abundância (jorro) comparados na mesma condição.....	118
Figura 4.32	Gráfico de tendências da força de avanço em função: (a) vc , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.....	119
Figura 4.33	Gráfico da média do momento M_z e desvio padrão, para cada óleo, jorro e seco, nos testes T1 a T4 $L = 1,5 \times D$, $Q = 50$ ml/h.....	120
Figura 4.34	Gráfico da média da força F_z e desvio padrão, para cada óleo, jorro e seco, nos testes 1- 4, $L = 1,5 \times D$, $Q = 50$ ml/h... ..	121
Figura 4.35	Diagrama de dispersão do crescimento para os quatros tratamentos para cada óleo em relação aos momentos.....	123
Figura 4.36	Gráfico dos erros médios do momento M_z , em função dos óleos para os testes 1 - 4, $L = 1,5 \times D$, $Q = 50$ ml/h.....	124
Figura 4.37	Gráfico dos resíduos padronizados (estimativa de erros), para os momentos (M_z) dos testes T1 a T4, $L = 15$ mm.....	124
Figura 4.38	Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições T1 a T4 na furação $L = 1,5 \times D$, girassol MQF, $Q = 50$ ml/h.....	125
Figura 4.39	Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições T5 a T8 na furação, $L= 5 \times D$, girassol MQF, $Q = 50$ ml/h.....	126
Figura 4.40	Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições T1 a T4 na furação $L = 1,5 \times D$, a seco.....	126
Figura 4.41	Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições T5 a T8 na furação, $L= 5 \times D$, a seco.....	125
Figura 4.42	Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço F_z em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 girassol MQF, $Q=50$ ml/h e a seco.....	127
Figura 4.43	Gráfico de tendências do momento M_z :(a) vc , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.....	129

Figura 4.44	Gráficos do momento m_z em função do tempo, das condições t_1 a t_4 na furação $l=1,5 \times d$ do óleo comercial Ib2000 aplicado na forma mqf, $q = 50 \text{ ml/h}$	130
Figura 4.45	Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições T_5 a T_8 na furação, $L = 5 \times D$, do óleo comercial LB2000, aplicado na forma MQF, $Q = 50 \text{ ml/h}$	130
Figura 4.46	Gráfico da média e desvio padrão do momento M_z em função dos testes, (a) T_1 a T_4 e (b) T_5 a T_8 girassol e LB2000, MQF a $Q=50 \text{ ml/h}$	131
Figura 4.47	Gráfico de tendências dos momentos em função: M_z : (a) vc , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.....	132
Figura 4.48	Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições T_1 a T_4 na furação $L = 1,5 \times D$ da aplicação de fluido em abundância (jorro), $Q = 750 \text{ l/h}$	133
Figura 4.49	Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições T_5 a T_8 na furação, $L = 5 \times D$, da aplicação de fluido em abundância (jorro), $Q = 750 \text{ l/h}$	134
Figura 4.50	Gráfico da média e desvio padrão do momento M_z em função dos testes, (a) T_1 a T_4 e (b) T_5 a T_8 girassol MQF a 50 ml/h , e jorro a $Q=750 \text{ l/h}$	134
Figura 4.51	Gráfico de tendências dos momentos M_z em função: (a) vc , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.....	136
Figura 4.52	Gráfico do momento M_z em função do tempo, das condições T_1 a T_4 na furação $L=1,5 \times D$, canola MQF, $Q = 50 \text{ ml/h}$	137
Figura 4.53	Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições T_5 a T_8 na furação $L= 5 \times D$, canola MQF, $Q = 50 \text{ ml/h}$	137
Figura 4.54	– Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço F_z em função dos testes, (a) T_1 a T_4 e (b) T_5 a T_8 canola, MQF a $Q=50 \text{ ml/h}$ e a seco.....	138

Figura 4.55	– Gráfico de tendências do momento M_z do óleo de canola e a seco em função: (a) v_c , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.....	139
Figura 4.56	– Gráfico da média e desvio padrão do momento em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 de canola e LB2000, MQF a $Q = 50$ ml/h.....	140
Figura 4.57	– Gráfico de tendências do momento M_z de canola e Lb2000 em função: (a) v_c , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.....	141
Figura 4.58	– Gráfico da média e desvio padrão do momento em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 canola, MQF a $Q=50$ ml/h e jorro.....	142
Figura 4.59	– Gráfico de tendências do momento M_z de canola e jorro, em função: (a) v_c , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.....	143
Figura 4.60	– Gráfico da Força de avanço (F_z) na furação, com variação da profundidade de corte. Pre-furos: 4,6,8 (mm), $L = 3 \times D$, $V_c = 25$ m/min $f = 0,1$ mm/rot (a) girassol; (b) jorro.....	144
Figura 4.61	– Gráfico da Força de avanço (F_z) na furação com variação da velocidade de corte (V_c) (m/min), $L = 3 \times D$, $f=0,10$ mm/rot. (a) girassol; (b) jorro.....	145
Figura 4.62	– Gráfico da Força de avanço F_z na furação com variação do avanço (f), $L = 3 \times D$, $V_c = 25$ m/min, (a) girassol, (b) jorro.....	146
Figura 4.63	– Gráfico da Força de avanço F_z na furação com variação do comprimento (L), $V_c=25$ m/min., $f=0,10$ mm/rot. (a) girassol, (b) jorro.....	146
Figura 4.64	– Aspectos das brocas utilizadas nos testes após o fim de vida na furação a seco e com óleo de girassol na forma MQF comparados na mesma condição de corte.....	148
Figura 4.65	– Gráfico da evolução dos desgastes dos testes (a) T1 e T5, (b) T2 e T6, girassol e a seco, comparados nas mesmas condições, $L=30$ mm.....	149
Figura 4.66	– Gráfico da evolução dos desgastes dos testes (c) T3 e T7, (d) T4 e T8, girassol e a seco, comparados nas mesmas condições de corte, $L = 30$ mm.....	149

Figura 4.67	– Gráfica da média dos furos da furação a seco e óleo de girassol comparados na mesma condição de corte, L=30 mm.....	150
Figura 4.68	– Gráfico das estimativas de efeitos dos parâmetros de entrada na vida da ferramenta analisada pelo número de furos: (a) vc, (b) f e (c) atm.....	151
Figura 4.69	– Aspectos das pontas de corte das brocas HSS utilizadas nos testes após o fim de vida do fluido LB2000 e óleo de girassol na forma MQF.....	153
Figura 4.70	– Gráfica da evolução dos desgastes dos testes (a) T1 e T5, (b) T2 e T6, girassol e LB2000, comparados nas mesmas condições, L=30 mm.....	154
Figura 4.71	– Gráfica da evolução dos desgastes dos testes T3 e T7, T4 e T8, girassol e LB2000, comparados nas mesmas condições, L=30 mm.....	154
Figura 4.72	– Gráfico da média dos furos do fluido LB2000 e óleo de girassol comparados nas mesmas condições de corte, L=30 mm.....	155
Figura 4.73	– Gráfico das estimativas de efeitos dos parâmetros de entrada na vida da ferramenta do fluido LB2000 em comparação ao óleo de girassol, analisada pelo nº de furos (a) vc, (b) f e (c) atmosfera.....	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Velocidade de corte para brocas em aço rápido. Fonte: KOLE, et al., (1997).....	36
Tabela 2.2	– Aplicações potenciais de vários óleos vegetais.....	68
Tabela 3.1	– Composição química (% em massa) do material utilizado nos ensaios fornecido pelo Fabricante.....	80
Tabela 3.2	– Ensaio de dureza Vickers 40 kg do material usinado.....	81
Tabela 3.3	– Variáveis de entrada a dois níveis.....	87
Tabela 3.4	– Matriz de planejamento fatorial.....	88
Tabela 3.5	– Formas de aplicação, vazão do fluido e ensaios realizados....	88
Tabela 4.1	– viscosidade dos óleos vegetais e fluido sintético.....	93
Tabela 4.2	– Resultados dos índices de acidez dos fluidos utilizados.....	94
Tabela 4.3	– Resumo da ANOVA para os testes de 1 a 4, L=15 mm.....	97
Tabela 4.4	– Comparação das diferenças das médias pelo método Tukey..	98
Tabela 4.5	– Principais efeitos médios das variáveis de entrada canola x a seco.....	104
Tabela 4.6	– Principais efeitos médios das variáveis de entrada canola x LB2000.....	108
Tabela 4.7	– Principais efeitos médios das variáveis de entrada canola x jorro.....	111
Tabela 4.8	– Principais efeitos médios das variáveis de entrada girassol x a seco.....	115
Tabela 4.9	– Principais efeitos médios das variáveis de entrada girassol x LB2000.....	117
Tabela 4.10	– Principais efeitos médios das variáveis de entrada girassol x jorro.....	119
Tabela 4.11	– Resumo da ANOVA para os testes de 1 a 4, L=15 mm para momento Mz.....	122
Tabela 4.12	– Comparação das diferenças das médias pelo método Tukey..	122

Tabela 4.13	– Principais efeitos médios das variáveis de entrada girassol x a seco.....	128
Tabela 4.14	– Principais efeitos médios das variáveis de entrada girassol x LB2000.....	132
Tabela 4.15	– Principais efeitos médios das variáveis de entrada girassol x jorro.....	135
Tabela 4.16	– Principais efeitos médios das variáveis de entrada canola x a seco.....	139
Tabela 4.17	– Principais efeitos médios das variáveis de entrada canola x LB2000.....	141
Tabela 4.18	– Principais efeitos médios das variáveis de entrada canola x jorro.....	143
Tabela 4.19	– Sumário da estimativa de efeitos dos parâmetros de entrada a seco e girassol.....	151
Tabela 4.20	– Sumário da estimativa de efeitos dos parâmetros de entrada.....	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	– Instituto Nacional Americano de Padronização
CNC	– Comando Numérico Computadorizado
DMM	– Departamento de Ciência e Tecnologia do Maranhão
EP	– Extrema pressão
Fig	– Figura
F-valor	– Valor de F que compara as variâncias
HRc	– Dureza Rockewll C
HSS	– aço - rápido (high-speed steel)
HV	– Dureza Vickers
IFMA	– Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão
KT	– Profundidade de desgaste de cratera
L/D	– Relação do comprimento (L) em função do diâmetro (D)
MO	– Microscopia óptica
MQ	– Media dos quadrados
MQF	– Mínima quantidade de fluido
MQL	– Mínima quantidade de lubrificante
nGL	– Número de graus de liberdade
OSG	– Osawa Screw Grinding
P-valor	– Nível descritivo (Probabilidade de significância).
SQ	– Soma dos quadrados
Tab	– Tabela

LISTA DE SÍMBOLOS

\emptyset	–	Diâmetro
b	–	largura de usinagem
d	–	Diâmetro da broca
D	–	Diâmetro do furo gerado pela broca
f	–	Avanço de corte
F_c	–	Força de corte
F_p	–	Força passiva
F_z	–	Força de avanço
K_c	–	Pressão específica de corte
L	–	Comprimento de corte
$M2$	–	Aço rápido ao molibdênio
MPa	–	Mega pascal
M_t	–	Momento torçor
N	–	Newton
n	–	Rotação
$N.m$	–	Newton.metro
P_c	–	Potência de corte
Q	–	Vazão do fluido
s	–	Segundo
T	–	Temperatura
t_f	–	Tempo de furação
$VB_{MÁX}$	–	Desgaste de flanco máximo
VB_{MED}	–	Desgaste de flanco médio
v_c	–	Velocidade de corte
δ	–	Ângulo de hélice da broca
θ	–	Ângulo de contato ou ângulo de molhabilidade

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	26
1 INTRODUÇÃO.....	26
1.1 Conceitos Gerais.....	26
1.2 Objetivo.....	29
1.3 Metas Estabelecidas para o Desenvolvimento deste Trabalho.....	29
CAPÍTULO II.....	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	30
2.1 O Processo de Furação.....	30
2.1.1 <i>Generalidades.....</i>	30
2.1.2 <i>Definições.....</i>	33
2.1.3 <i>Brocas helicoidais de aço rápido.....</i>	37
2.1.4 <i>Defeitos geométricos em furos.....</i>	41
2.2 Aços Carbono e suas Ligas.....	42
2.2.1 <i>Usinabilidade dos Aços e suas Ligas.....</i>	43
2.3 Desgastes e Mecanismos Desgastes em Brocas.....	44
2.3.1 <i>Mecanismos de desgastes.....</i>	44
2.3.2 <i>Formas de desgaste e avarias em brocas.....</i>	46
2.4 Esforços de Usinagem na Furação.....	49
2.4.1 <i>Forças de usinagem.....</i>	50
2.4.2 <i>Torque.....</i>	52
2.4.3 <i>Medições de esforços na furação.....</i>	53
2.5 Fluidos de Corte.....	54
2.5.1 <i>Funções do fluido de corte.....</i>	56
2.5.2 <i>Razão para utilização do fluido de corte.....</i>	57
2.5.3 <i>Classificação dos fluidos de corte.....</i>	59
2.5.4 <i>Direção de aplicação dos fluidos de corte.....</i>	60
2.5.5 <i>Fluidos de corte como refrigerante.....</i>	62
2.5.6 <i>Fluidos de corte como lubrificante.....</i>	62
2.5.7 <i>Fluidos de corte de base vegetal.....</i>	63
2.5.8 <i>Vantagens e desvantagens dos fluidos vegetais.....</i>	66

2.5.9	Óleos comestíveis vegetais: tipos, características e propriedades.....	67
2.6	Emprego dos fluidos de corte nos dias mais recentes.....	68
	CAPÍTULO III.....	75
3	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	75
3.1	Considerações Iniciais.....	75
3.2	Procedimentos experimentais realizados em laboratório.....	76
3.2.1	<i>Testes de molhabilidade.....</i>	76
3.2.2	<i>Testes de refrigeração.....</i>	76
3.2.3	<i>Testes de lubrificidade.....</i>	78
3.2.4	<i>Análise físico-química dos óleos vegetais.....</i>	79
3.3	Material da peça utilizada.....	80
3.3.1	<i>Caracterização do material usinado.....</i>	80
3.4	Ferramentas e equipamentos utilizados.....	82
3.4.1	<i>Ferramenta utilizada.....</i>	82
3.4.2	<i>Máquina ferramenta.....</i>	83
3.4.3	<i>Sistemas de aplicação dos fluidos.....</i>	83
3.5	Fluidos utilizados e características típicas.....	84
3.6	Parâmetros de monitoramento da vida e desgaste da ferramenta.	85
3.7	Medição de forças e torque.....	85
3.8	Planejamentos dos experimentos.....	87
	CAPÍTULO IV.....	89
4	RESULTADOS E ANALISES EXPERIMENTAIS.....	89
4.1	Considerações Iniciais.....	89
4.1.1	<i>Resultados dos testes de molhabilidade.....</i>	89
4.1.2	<i>Resultados dos ensaios de refrigeração.....</i>	91
4.1.3	<i>Resultados dos ensaios de lubrificidade ou ensaios de energia específica.....</i>	92
4.1.4	<i>Resultados dos ensaios físico – químicos.....</i>	93
4.2	Análises da Força de Avanço.....	95
4.2.1	<i>Força de avanço canola x usinagem a seco.....</i>	101

4.2.2	<i>Análise estatística dos dados canola x a seco</i>	104
4.2.3	<i>Força de avanço canola x LB2000</i>	105
4.2.4	<i>Análise estatística dos dados canola x LB2000</i>	107
4.2.5	<i>Força de avanço canola x jorro</i>	109
4.2.6	<i>Análise estatística dos dados canola x jorro</i>	111
4.2.7	<i>Forças de avanço: girassol x a seco</i>	112
4.2.8	<i>Análise estatística dos dados girassol x a seco</i>	114
4.2.9	<i>Força de avanço girassol x LB2000</i>	116
4.2.10	<i>Análise estatística dos dados girassol x LB2000</i>	117
4.2.11	<i>Força de avanço girassol x fluido em abundância (jorro)</i>	118
4.2.12	<i>Análise estatística dos dados: girassol x jorro</i>	119
4.3	Análise do Momento (Mz)	120
4.3.1	<i>Análise do Momento Mz: girassol x a seco</i>	125
4.3.2	<i>Análise estatística dos momentos Mz: girassol x a seco</i>	128
4.3.3	<i>Análise do momento Mz: girassol x LB2000</i>	129
4.3.4	<i>Análise estatística dos momentos Mz: girassol x LB2000</i>	131
4.3.5	<i>Análises dos momentos Mz: girassol x jorro</i>	133
4.3.6	<i>Análise estatística dos momentos Mz: girassol x jorro</i>	135
4.3.7	<i>Análises do momento Mz: canola x a seco</i>	136
4.3.8	<i>Análise estatística dos momentos de canola x a seco</i>	138
4.3.9	<i>Análises dos momentos Mz: canola x LB2000</i>	140
4.3.10	<i>Análise estatística dos momentos Mz: canola x LB2000</i>	140
4.3.11	<i>Análises dos momentos Mz: canola x jorro</i>	142
4.3.12	<i>Análise estatística dos momentos Mz: canola x jorro</i>	143
4.4	Análise da Influência dos Parâmetros de Corte	144
4.4.1	<i>Influência da variação da profundidade de corte</i>	144
4.4.2	<i>Influência da variação da velocidade de corte (Vc)</i>	145
4.4.3	<i>Influência da variação do avanço (f)</i>	145
4.4.4	<i>Influência da variação do comprimento de corte (L)</i>	146
4.5	Ensaios de vida da ferramenta	147

4.5.1	<i>Ensaios de vida: girassol x a seco</i>	147
4.5.2	<i>Ensaios de vida girassol x LB2000</i>	151
	CAPÍTULO V	157
	CONCLUSÕES	157
	CAPÍTULO VI	159
	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	159
	CAPÍTULO VII	160
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160
	CAPÍTULO VIII	170
	APÊNDICES	170
	CAPÍTULO IX	199
	ANEXOS	199

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Conceitos gerais

Os processos de usinagem consistem em operações que, ao conferir à peça a sua forma, dimensões e acabamento, gerarão cavacos e estão entre os processos de fabricação mais importantes na indústria metal-mecânica e presentes em praticamente todas as fases de manufatura de componentes nas mais diversas áreas RIOS (2005). A produtividade e a qualidade de um processo de usinagem dependerão de vários fatores, tais como usinabilidade dos materiais, potência e rigidez de máquinas e equipamentos, ferramentas de corte, morfologia de cavaco, lubrificação e refrigeração FERRARESI (1997); DRODZDA; WICK, (1993).

Na Idade Média utilizavam-se sílex e ossos como ferramentas em uma espécie de furadeira manual que dependeria principalmente da habilidade de seu executor. Também existem registros que indicam que esta foi uma das primeiras operações executadas em metal. Mesmo ao longo de todos estes anos a furação manteve sua importância dentro dos processos de fabricação, sendo ainda hoje de grande importância nos processos industriais. A importância da furação poderá ser avaliada no consumo de ferramentas, que, atualmente, é estimado como sendo da ordem de 250 milhões de unidades por ano AMORIM (2003); VIANA (2004).

A furação é um dos processos mais importantes na indústria de manufatura e por ser geralmente a última operação de usinagem realizada no processo produtivo. Exerce particular ênfase na confiabilidade do processo Ferraresi (1997); Sharman et al. (2008). Devido à crescente industrialização, as empresas buscam constantemente a melhoria nos processos de fabricação e a redução de seus custos. Dentro destes processos, a furação é talvez a operação mais utilizada nos processos industriais de fabricação e, por isso, merece atenção especial. Assim sendo, várias pesquisas são realizadas. (DINIZ et al., 2006).

Dada a frequência com que é utilizada para a produção das mais variadas peças e componentes, a furação reveste de fundamental importância para as indústrias aeroespaciais, aeronáuticas e automotivas. É interessante conhecer-se o desempenho do processo, como, por exemplo, o comportamento das forças e potências em usinagem Al-Hamdan (2004). Conhecendo-se as forças atuantes sobre a cunha cortante, poder-se-á não só estimar a potência necessária à realização do corte, mas também dispor de informações importantes para a construção de máquinas-ferramentas Stemmer (1989). A complexa geometria da ferramenta cortante, nesse processo, obriga que as pesquisas relativas a ele baseiem-se mais ainda em dados experimentais. A geometria de uma broca é muito mais complexa do que a das ferramentas utilizadas em outros processos Ferraresi (1977); Lim (1995); Shouckry (2000), o que dificultará ainda mais a realização de ensaios experimentais.

Em 1984, Frederick Winslow Taylor observou que, aplicando grande quantidade de água na região de corte, seria possível aumentar a velocidade de corte em 33%, sem prejuízo para a vida da ferramenta Ruffino (1977), Machado et al. (2009). Desde então, grandes avanços tecnológicos têm sido obtidos, tanto no que diz respeito aos materiais quanto no que se refere às máquinas-ferramentas, fazendo com que a demanda por fluido de corte crescesse consideravelmente.

Um dos principais fatores que comprometem o desempenho da ferramenta de corte e as propriedades da peça é o calor gerado na região de interface entre a broca e a peça Bagci; Ozcelik, (2007). A geração elevada de calor nessa influência mútua poderá ocasionar zonas com alterações micro estruturais, variações geométricas e defeitos metalúrgicos na região subsuperficial, como trincas e tensões residuais. (BASAVARAJAPPA et al., 2007).

Alterações ocasionadas na integridade superficial, geradas por solicitações térmicas e mecânicas, comprometem grandemente as propriedades mecânicas superficiais e subsuperficiais, causadas por alterações metalúrgicas na microestrutura do material. Nesse contexto, a utilização de fluidos de corte mostra-se eficaz na redução da temperatura, do atrito e melhoria do transporte do cavaco, gerando a diminuição das zonas termicamente afetadas (BASAVARAJAPPA et al., 2007).

Apesar da significativa importância dentro da produção no setor metal-mecânico (melhoria no acabamento, expulsão de cavaco da região de corte e controle dimensional), os fluidos de corte vêm enfrentando, durante os últimos anos, sérias limitações com relação ao seu uso nos processos de usinagem. Sendo assim, há uma tendência mundial pela redução e/ou eliminação da aplicação dos fluidos na usinagem. Os fatores importantes que justificam este procedimento incluem os elevados custos operacionais, as questões ecológicas, a preservação do meio ambiente e a saúde do ser humano. Porém, em muitos casos a refrigeração ainda é essencial para se obter vidas econômicas de ferramentas e qualidades superficiais e dimensionais requeridas.

(BELEJCHAK, 1997; HEISEL et al., 1998; BRAGA et al., 2002).

Para que a utilização do fluido lubrificante seja minimizada, duas técnicas têm sido experimentadas: o corte completamente sem fluido ou com aplicação de ar comprimido, e o com Mínima Quantidade de Fluido (MQF), no qual uma quantidade muito pequena de óleo é fornecida ao gume através de utilização de ar comprimido. Neste caso, uma quantidade reduzida de óleo é utilizada na lubrificação e o ar comprimido é o componente principal na condução do óleo e para auxiliar na retirada de cavacos (MACHADO; DINIZ, 2000; YOSHIMURA, 2006).

Atualmente as aplicações de fluidos de corte nas operações de usinagem estão sendo cada vez mais empregadas por meio da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) que age com base no princípio de utilização de pequenas quantidades de óleo sem resíduos. Nesta tecnologia a função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração, mesmo que pequena, pelo ar comprimido. Esta pequena quantidade de fluido é suficiente para reduzir o atrito no corte, diminuindo a tendência à aderência em materiais com tais características Bezerra (2003); COSTA et al., (2004).

De acordo com Krishna et al. (2010) o calor gerado na zona de corte durante a usinagem é crítico para a qualidade final da peça. O referido pesquisador destaca ainda que, apesar de fluidos de corte serem amplamente utilizados para diminuir a temperatura na usinagem, se sugere a necessidade de desenvolver alternativas ecológicas saudáveis e de fácil utilização para os fluidos de corte convencionais em função dos problemas que podem ser causados ao ser humano e ao meio ambiente. No entanto Rios (2005) ressalta que as leis ambientais nos dias atuais para a utilização dos fluidos de corte são reflexos das mudanças de comportamento da sociedade frente aos danos gerados, em grande parte pelas indústrias.

A crescente atenção aos impactos ambientais e as regulamentações governamentais às atividades industriais, além do crescente nível de consciência da sociedade, têm迫使 as indústrias a reduzirem o uso de fluidos de corte a base de óleo mineral. Fluidos de corte têm sido amplamente utilizados nos últimos 20 anos. No início eram constituídos de óleos simples aplicados com escovas para lubrificar e arrefecer a máquina-ferramenta. Como as operações de usinagem se tornaram mais severas, houve a necessidade de desenvolvimento de fluidos de corte mais eficientes. Existem atualmente vários tipos de fluido de corte no mercado e os tipos mais comuns podem ser amplamente classificados como óleos de corte ou fluidos miscíveis em água. Tem sido relatado na literatura que diferentes fluidos de corte, que são à base de óleo vegetal, poderão ser um modo menos prejudicial ao ambiente com desempenho semelhante obtido utilizando os fluidos à base de óleo mineral para metais. (LAWAL et al., 2012).

1.2 Objetivo

Considerando-se que o foco é a produtividade aliada às normas ambientais, além da justificativa de utilizar fluidos de corte menos prejudiciais ao meio ambiente e menos agressivo à saúde humana que os outros tipos de fluidos de base mineral, este trabalho justifica-se pela proposta de utilização de fluidos de corte vegetal para furação de um aço médio carbono ABNT 1045. Este material é muito empregado na indústria metal-mecânica para fabricação de componentes de máquinas e equipamentos. O objetivo da pesquisa foi investigar o desempenho de cinco óleos vegetais comestíveis (babaçu, soja, milho, canola e girassol) aplicados na forma MQF comparando com aplicação de fluido em abundância (jorro), fluido vegetal comercial LB2000 e a condição a seco, no processo de furação com brocas de aço rápido sob diversas condições de corte (velocidade de corte, avanço e comprimento do furo), considerando-se, além das forças e torque durante o processo, a vida e desgaste da ferramenta.

1.3 Metas estabelecidas para o desenvolvimento deste trabalho

No âmbito da definição do plano de trabalho, as metas estabelecidas para atingir os objetivos planejados são:

- a) Realizar a caracterização do material da peça;
- b) Caracterizar os óleos vegetais comestíveis e os demais fluidos utilizados;
- c) Caracterizar ferramentas, máquinas e equipamentos a utilizados;
- d) Detalhar a metodologia a utilizada;
- e) Aplicar o planejamento fatorial na realização dos ensaios para obtenção das forças de avanço e torque;
- f) Determinar experimentalmente o desgaste e vida da ferramenta de corte através do número de furos usinados;
- g) Determinar e analisar os efeitos dos parâmetros e dos óleos investigados;
- h) Aplicar ferramentas estatísticas para analisar a variância dos dados ANOVA e saber se diferentes níveis das variáveis independentes afetam a variável dependente; e
- i) Realizar ensaios complementares para ajudar a justificar os resultados obtidos.

CAPITULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Processo de furação

2.1.1 *Generalidades*

A furação é um dos processos de usinagem mais antigos que existem (WYATT; TRMAL, 2006). Os primeiros registros históricos do emprego da furação demonstram que há mais de 4000 anos os egípcios já utilizavam esse processo em suas construções (BRAGA et al., 1999; ZHANG 2010; WANG, 2010).

Desde então, tem havido uma evolução gradual da operação de furação. Com o passar dos anos, eventos como a Revolução Industrial e duas guerras mundiais proporcionaram um avanço tecnológico em diversas áreas; consequentemente, a utilização de furos ganhou inúmeras aplicações (GOLDACKER; OLIVEIRA, 2008; FARAZ et al., 2009).

Conforme Costa (2004) a grande maioria das peças de qualquer tipo de indústria do setor metal-mecânica tem pelo menos um furo, e somente uma parte muito pequena dessas peças já vem com o furo pronto do processo de obtenção da peça bruta, como acontece no caso da fundição, do forjamento, etc. A Fig. 2.1 mostra os valores médios, o tempo de usinagem empregado para quatro processos e o número de operações em função do processo.

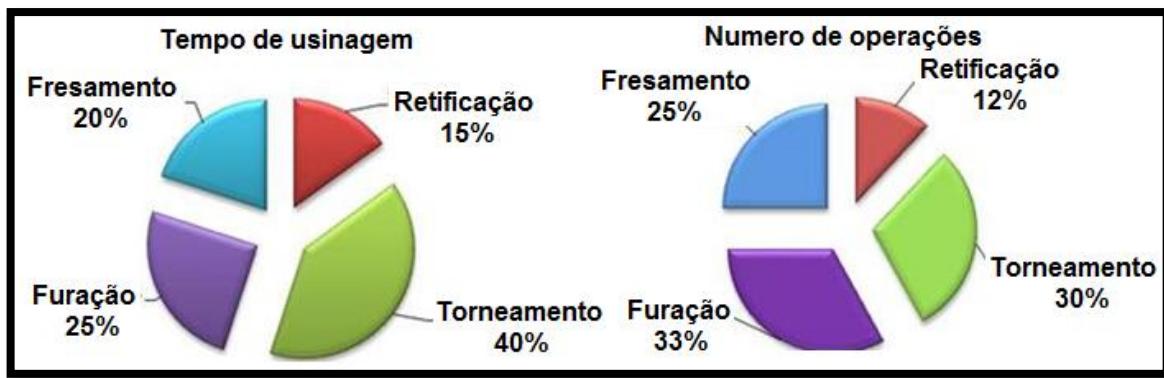


Figura 2.1 - Operações de usinagens no setor metal-mecânico
Fonte: Tönshoff et al. (1994).

De acordo com De Castro (2001) o processo de furação possui várias particularidades, que são fatores complicadores do processo, dentre as quais podemos citar:

- O processo de geração do cavaco é interno (escondido) e existe um espaço limitado nos canais para a remoção dos cavacos. Com isso o transporte dos mesmos para fora da região de corte será dificultado;
- A velocidade de corte não é uniforme, variando desde zero, no centro do furo, até um máximo na periferia, sendo isto um grande problema;
- A lubrificação/refrigeração da região de corte é comprometida e o fluido de corte chega com dificuldade (ou não chega) à parte de trabalho da ferramenta;
- Há uma distribuição inadequada de calor na região de corte; e
- Ocorrem atrito e desgaste pronunciados nas quinas com cantos vivos.

De acordo com Huang (2009) a execução de furos também poderá ser realizada por meio de outros processos de fabricação mecânica. Por exemplo: estampagem, Usinagem por descargas elétricas; por plasma, a Laser, entre outros. Entretanto, algumas características como o local onde é executado o furo, os custos e a espessura do material a ser usinado, acabarão inviabilizando a utilização desses processos Hwang et al., (2008).

Junto com o processo de fresamento e torneamento, a furação é a operação de usinagem mais utilizada na indústria metal-mecânica. Diferente do processo de torneamento, a rotação ocorre no eixo da ferramenta, com avanço perpendicular à superfície a ser furada Stemmer, (2001). De acordo com Ferraresi (1997), o processo de furação é empregado para a obtenção de um furo, geralmente cilíndrico, numa peça com auxílio de uma ferramenta, geralmente multicortante. Durante a operação, a ferramenta ou a peça girará e, simultaneamente, a ferramenta ou a peça se deslocará segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela com o eixo principal de rotação da máquina. Para Ferraresi (1997) o processo de furação pode subdividir-se em operações de furação em cheio,

escareamento, furação escalonada, furação de centros, trepanação, entre outros. A ferramenta destinada a este processo denomina-se broca.

Os fatores que definem o campo de aplicação do processo de furação, segundo o Metals Handbook (1989), são descritos a seguir.

- 1) Quanto ao material da peça: O processo de furação poderá ser aplicado em materiais com dureza de até 60 HRC. Essa faixa de dureza engloba a grande maioria dos materiais de construção mecânica, inclusive alguns aços para ferramenta. Já para os aços especiais, como os aços-rápidos, alguns aços ferramenta para trabalho a frio e a quente e para moldes de injeção de plásticos, que possuem dureza superior, geralmente são empregadas outras técnicas para a fabricação de furos.
- 2) Quanto ao diâmetro do furo: As brocas mais empregadas possuem diâmetros que variam de 3,2 a 38 mm (1/8 a 1½ polegadas). Com a aplicação de técnicas especiais pode-se produzir furos de diâmetros entre 0,25 a 3,2 mm (microfuração). Brocas especiais permitirão a execução de furos de até 152 mm (6 polegadas) de diâmetro, podendo, em operações especiais, chegar a 750 mm.

Algumas brocas com diâmetros na faixa de micrômetros poderão ser encontradas. A Fig. 2.2 mostra um exemplo de uma broca de metal duro, de 20 μm de diâmetro.

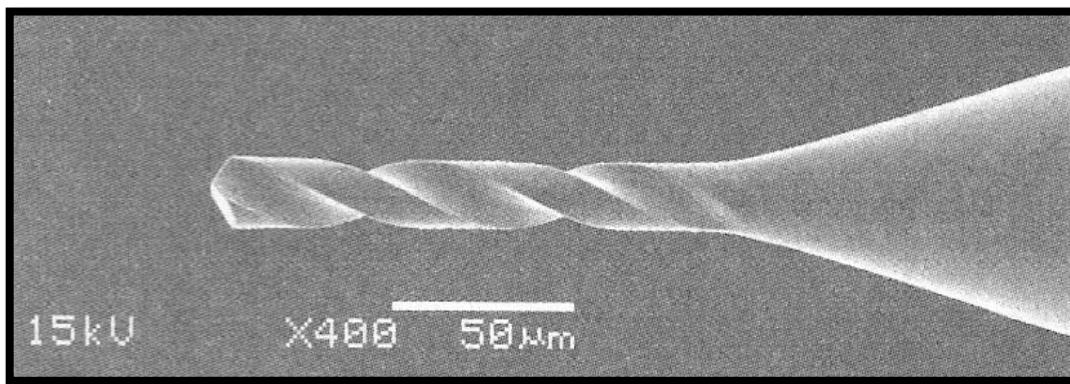


Figura 2.2 - Broca especial de 20 μm diâmetro.
Fonte: OSG (2010).

- 3) Quanto à relação comprimento/diâmetro do furo – (L/D): Esse fator dependerá do método utilizado e do desvio de linearidade requerido. Os métodos mais simplificados permitirão que o comprimento do furo seja até 3 vezes maior que o seu diâmetro. A utilização de ferramentas, técnicas e equipamentos

especiais permitirão a elevação dessa relação para 8. Sistemas especiais de furação, como a utilização de brocas canhão, sistemas “*ejector drilling*” e o sistema BTA (“*boring and trepaning association*”), permitirão a execução de furos com relação comprimento/diâmetro superior a 100 em uma faixa de diâmetros de 6 a 750 mm (LIM et al., 1995).

Diniz et al., (2006) destacam que uma das principais dificuldades encontradas no processo de furação é a extração dos cavacos de dentro do furo. Se os cavacos não forem forçados a sair do interior do furo, eles poderão causar o entupimento do mesmo, aumentando o momento torsor e por consequência a quebra da ferramenta. O que resultará em perdas relacionadas à ferramenta, geralmente inutilizada pela quebra, o retrabalho para retirar a ferramenta do furo e em muitas vezes a rejeição da peça.

Conforme Bork (1995), as características do material a ser usinado, tais como a estrutura e a ductilidade, são decisivas na formação do cavaco, assim como a geometria da ferramenta e as condições de corte. Os cavacos podem ser identificados pelo tipo (contínuo, descontínuo, parcialmente contínuo e segmentado) e pelo formato (em fita, helicoidal, espiral, em formato de vírgula e lascas ou pedaços) sendo os cavacos helicoidais ou em lascas os que mais facilmente podem ser removidos dos furos. (DINIZ et al., 2006).

Stemmer (1995) afirma que a remoção do cavaco poderá ser ainda auxiliada pela utilização de um ciclo intermitente de furação onde a interrupção do avanço da ferramenta e a sua retirada de dentro do furo expulsarão os cavacos e limparão os canais da broca; contudo, essa prática gerará um aumento nos tempos de usinagem. Além desta, alternativa aplicada para remoção dos cavacos é a injeção de fluido de corte sob pressão, através de canais na broca, diretamente no fundo furo. (DINIZ et al., 2006).

2.1.2 Definições

Conforme Peng et al. (2008), Stemmer (2001); Wang, Zhang (2008), as operações do processo de furação são consideradas nos dias atuais, as mais difíceis de serem executadas dentre os processos de usinagem. Afirmam que isso é atribuído a multiação da broca em realizar o furo na peça a ao mesmo tempo, durante a operação, remover o cavaco de maneira instantânea, de modo a impedir o atrito dos cavacos com as paredes do furo, gerando como consequência um aumento nos esforços de corte, podendo levar a broca ao colapso. No decorrer da operação, as brocas também possuem a função de facilitar a penetração, ou promover a condução do fluido até a região mais próxima da aresta de corte, local este onde é gerado calor devido ao atrito produzido entre a broca e a peça que de alguma forma contribui para o aumento do desgaste e redução da vida útil da broca.

Os movimentos de usinagem, que tornam possível o processo de furação, são classificados em dois grupos, os movimentos que não tomam parte diretamente na retirada de cavaco e os que causam diretamente a saída de cavaco, os quais podem ser classificados em (ABNT 6162, 1989):

- Movimento de avanço (V_f) é o movimento entre a peça e a ferramenta, o qual juntamente com o movimento de corte originará retirada contínua de cavaco;
- Movimento de corte (V_c) movimento entre a peça e a ferramenta; ele sem o movimento de avanço originará somente uma única retirada de cavaco; e
- Movimento efetivo de corte (V_e) é o movimento resultante gerado quando os movimentos de avanço e de corte atuarem simultaneamente.

A figura 2.3 mostra os movimentos de corte, avanço e efetivo no processo de furação.

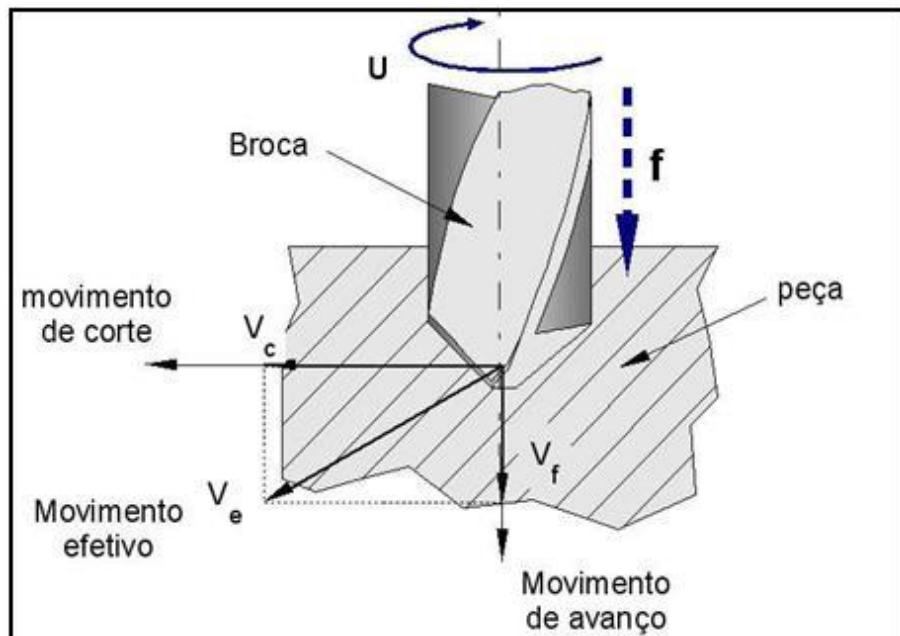


Figura 2.3 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo, na furação.
Fonte: ABNT 6162 (1989).

Quanto aos movimentos que não tomam parte diretamente na retirada de cavaco podem ser classificados em Diniz et al. (2006); ABNT 6162 (1989):

- Movimento de Aproximação: movimento entre a peça e a ferramenta, com a qual a ferramenta, antes da usinagem, será aproximada à peça.
- Movimento de Recuo: movimento entre a aresta de corte e a peça, pela qual a ferramenta, após a usinagem, será afastada da peça.

De acordo com o Metals Handbook (1989) o avanço de corte no processo de furação é definido como o espaço percorrido pela broca na direção longitudinal do seu eixo durante uma revolução completa da broca. Castillo, (2005), Costa, (2004), Diniz, (2006), afirmam que o aumento do avanço facilita a quebra e, consequentemente, a remoção do cavaco. Entretanto, o aumento do avanço com o intuito de quebrar o cavaco fará com que o ângulo efetivo de folga-se reduza e, com isso, gerará um aumento na deformação plástica do fundo do furo. Essa deformação poderá causar o encruamento do material e, por consequência, a elevação da força de avanço necessária ao corte, principalmente próximo ao centro, onde este ângulo é menor. Além do mais, existe um limite para o aumento do avanço. Acima de um determinado valor, o avanço poderá levar a ferramenta ao colapso ou a paralisação do avanço da máquina por falta de potência no eixo-árvore Hocheng; Tsao, (2007), Schroeter e Weingaertner (2001).

A escolha apropriada dos parâmetros de corte relacionados ao processo de furação é fundamental para obtenção de resultados satisfatórios de usinagem (LACALLE et al., 2000). Além do mais, a utilização dos parâmetros de usinagem inadequados poderá diminuir, de forma significativa, a vida útil das brocas e levá-la ao colapso Mansori et al., (2003). Para diminuir os transtornos é aconselhado que os parâmetros de furação fossem definidos antes da execução do corte. (DUAN; CHEN, 2009).

O primeiro parâmetro a ser determinado é a velocidade de corte. Conforme Diniz e colaboradores, a velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça Diniz et al. (2006). Stemmer (2001) afirma que a velocidade de corte está relacionado diretamente com o diâmetro do furo e com a rotação da ferramenta, e deve manter uma dependência direta com a vida da ferramenta, tempo de usinagem, material usinado, textura superficial e a potência consumida pela máquina-ferramenta durante o corte. A Eq. (2.1) mostra o cálculo para a velocidade de corte. (MACHADO et al., 2009).

$$Vc = \frac{\pi Dn}{1000} \quad (2.1)$$

onde:

- v_c = Velocidade de corte [m/min];
- D = Diâmetro da broca [mm]; e
- n = Rotação da ferramenta de corte [rpm].

A Eq. (2.2) é empregada para calcular a rotação da broca por minuto, nas operações de furação Kole et al. (1997).

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} = 318 \cdot \frac{V_c}{d} \quad (2.2)$$

onde:

n = rotações da broca por minuto [rpm];

V_c = velocidade de corte [m/min]; e

d = diâmetro da broca [mm].

O valor da rotação poderá ser obtido por meio de tabelas, que associam o diâmetro da broca a diversos tipos de materiais processados. (WALKER, 2004). Assim como a rotação a velocidade de corte também poderá ser obtida através de quadros, cujos valores são o resultado de experiências envolvendo as ferramentas de corte e diversos tipos de materiais Ferraresi, (1997); Kole et al. (1997). A Tab. 2.1 é utilizada para obter o valor da velocidade de corte para brocas helicoidais fabricadas em aço rápido em função do tipo de material a ser usinado.

Tabela 2.1 - Velocidade de corte para brocas em aço rápido.

METAIS FERROSOS

AÇO CARBONO	Velocidade de corte m/min
Com resistência até 500 N/mm ² (0,10% a 0,25% C)	28 - 32
Com resistência até 700 N/mm ² (0,30% a 0,45% C)	25 – 28
Com resistência até 900 N/mm ² (0,50% a 0,60% C)	20 - 25
AÇO LIGA E AÇO FUNDIDO	Velocidade de corte m/min
Com resistência até 900 N/mm ²	14 – 18
Com resistência até 1250 N/mm ²	10 – 14
Com resistência até 1500 N/mm ²	06 – 10

Fonte: Kole et al. (1997)

O segundo parâmetro a ser considerado na operação de furação é a velocidade de avanço. Em algumas máquinas o avanço da ferramenta de corte é realizado manualmente, por exemplo, em furadeiras de bancada Kole et al. (1997). Em máquinas onde o avanço é realizado de forma automática, a velocidade de avanço é calculada através da Eq. (2.3). (MACHADO et al., 2009).

$$V_f = f \cdot n = f \cdot \frac{1000 \cdot V_c}{\pi D} \quad (2.3)$$

onde:

- V_f = Velocidade de avanço [mm/min];

- f = Avanço [mm/volta];
- v_c = Velocidade de corte [m/min];
- D = Diâmetro da broca [mm]; e
- n = Rotação da ferramenta [rpm]

De acordo com Ferraresi (1977) a largura de corte é a largura de cavaco a ser removida, medida na superfície de usinagem principal, segundo a direção normal à direção de corte. É medida na interseção da superfície de usinagem com o plano normal à velocidade de corte, passando pelo ponto de referência da aresta. A Eq. (2.4) mostra o cálculo para a largura de usinagem. (CASTILLO, 2005).

$$b = \frac{D}{2 \operatorname{sen}(\frac{\sigma}{2})} \quad (2.4)$$

onde:

- b = Largura de usinagem [mm];
- D = Diâmetro da ferramenta [mm]; e
- σ = Ângulo da ponta da broca [°].

O tempo de furação é considerado como o tempo em que os movimentos de corte e de avanço estão efetivamente ocorrendo. A Eq. (2.5) mostra o cálculo para o tempo de furação (MACHADO et al., 2009).

$$t_f = \frac{l_f}{v_f} = \frac{l_f}{f \cdot n} = \frac{\pi D}{1000 \cdot v_c} \cdot \frac{l_f}{f} \quad (2.5)$$

onde:

- t_f = Tempo de furação [min];
- l_f = Comprimento de furação [mm].
- v_f = Velocidade de avanço [mm/min];
- v_c = Velocidade de corte [m/min];
- f = Avanço [mm/volta];
- D = Diâmetro da broca [mm]; e
- n = Rotação da ferramenta [rpm].

2.1.3 Brocas helicoidais de aço rápido

As brocas são ferramentas multicortantes, projetadas para a execução de furos cilíndricos. Até 1863 as brocas eram formadas apenas por um corpo cilíndrico e uma ponta com arestas. Visando aperfeiçoar a operação, Stephen Ambrose Morse inseriu sulcos

helicoidais na broca, para permitir a saída de cavacos, surgiu então a broca helicoidal. (ZHANG; WANG, 2010).

As brocas foram padronizadas justamente para evitar a fabricação descontrolada com dimensões e geometrias variadas. Atualmente as brocas são projetadas conforme a norma NBR 6176. (DINIZ et al., 2006; KOLE et al., 1997).

De acordo com Pangrácio (2003) e Richard et al. (2008) a maioria dos furos é realizada por brocas helicoidais, tanto na fabricação de furos em cheio como com pré-furos. A furação com broca helicoidal não poderá ser considerada uma operação de acabamento, devido ao pobre acabamento superficial em função da elevada rugosidade nas paredes do furo. Isso acontece principalmente na furação em cheio.

Diniz et al, (2006) e colaboradores destacam que a forma construtiva da broca é composta de uma haste cilíndrica e uma parte cortante que pode ser afiada de maneiras distintas conforme o material a ser usinado. Geralmente apresenta dois gumes principais ligados através da aresta transversal, contudo podem ter três ou mais gumes cortantes, a fim de reduzir os erros de posicionamento, melhorar o fluxo de cavacos e reduzir as forças de corte e avanço.

Conforme Stemmer (2005) as brocas são identificadas de acordo com o tipo de material da ferramenta, a forma da haste, o número de canais, o sentido de corte, o comprimento, o diâmetro e o tipo de afiação. Uma visão geral da broca é apresentada na Fig. 2.4, a seguir.

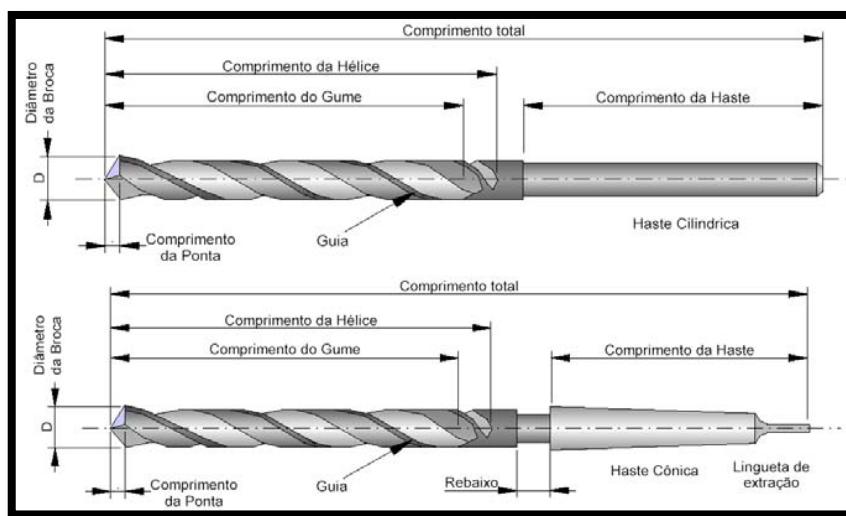


Figura 2.4 - Constituintes de uma broca helicoidal.

Fonte: Diniz et al. (2006) e Kole et al. (1997)

O mecanismo de fixação das brocas é feito através da haste. A haste pode ser de duas formas Diniz et al. (2006):

- 1) **Haste Cilíndrica** – utilizada em brocas de diâmetro pequeno (até 15 mm) e a fixação na máquina se dá por intermédio de mandril (mecânico, hidráulico ou térmico);
- 2) **Haste Cônica** – utilizada, geralmente, em brocas de diâmetro maiores que 15 mm. A fixação na máquina se dá por montagem em cone morse, o que possibilita maior força de fixação.
- 3) **Guias Cilíndricas**: a superfície externa de uma broca helicoidal apresenta duas regiões (uma em cada aresta de corte) que têm diâmetro maior que o diâmetro das paredes da broca. Tais regiões são denominadas guias cilíndricas e apresentam duas funções básicas – a primeira, como o próprio nome diz, é a de guiar a broca dentro do furo; a segunda é a de evitar que toda a parede externa da broca atrite com as paredes do furo, diminuindo assim os esforços necessários para a furação;
- 4) **Canais Helicoidais**: são as superfícies de saída da ferramenta. A geometria da broca exerce influência direta em seu desempenho. Os canais helicoidais devem ser largos o suficiente para garantir a remoção dos cavacos. Por outro lado, o aumento excessivo do tamanho dos canais reduzirá a resistência do corpo da broca, o que poderá resultar em vibrações e deformações não toleráveis durante o processo de furação. Nos canais helicoidais o ângulo formado pelo eixo da broca e uma reta tangente à hélice é denominado ângulo de hélice (δ). A hélice da broca tem a função de guiar os cavacos do interior dos furos, por meio dos canais e guiar a ferramenta ao longo do furo por meio das guias cilíndricas, que também são responsáveis pelo acabamento superficial das paredes dos furos. A Fig. 2.5 mostra os detalhes descritos.

A eficácia no corte está diretamente relacionada aos ângulos da ferramenta e ao tipo de material a ser furado Fedevjcyk et al. (2009). As brocas helicoidais possuem duas arestas cortantes simétricas Zeilmann et al. (2006). As duas arestas formam um ângulo na ponta da broca, conhecido como ângulo de ponta, representado pela letra grega σ (sigma). O valor deste ângulo é determinado conforme a resistência do material a ser trabalhado Costa (2009); Kole et al. (1997). A Figura 2.5 mostra o ângulo de ponta da broca.

O ângulo de hélice Figura 2.5, representado pela letra grega δ tem como objetivo direcionar e auxiliar a retirada do cavaco gerado na zona de corte Ferraresi (1997). Este ângulo é formado pelo eixo de simetria da broca e a inclinação da hélice Walker (2004); Zeilmann et al. (2006).

Para facilitar a penetração e reduzir o atrito, a broca possui um ângulo lateral de folga, conhecido como ângulo de incidência, representado pela letra grega, α (alfa),

conforme Fig. 2.5 Braga et al. (1999). De acordo com Walker (2004); Kole et al. (1997) este ângulo varia de 6° a 27° .

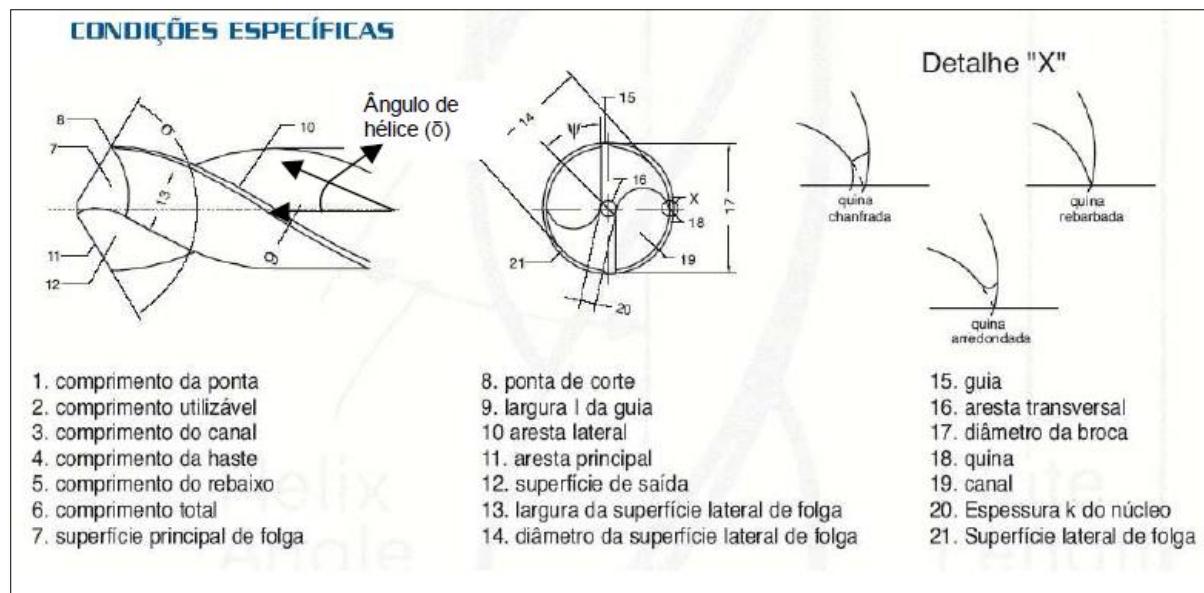


Figura 2.5 - Partes de uma broca helicoidal.

Fonte: Diniz et al. (2006); Kole et al. (1997)

Conforme Cardoso (1999), um dos materiais mais utilizados em ferramentas de corte é o aço-rápido. Os aços rápidos recebem este nome devido a sua capacidade de manter elevada dureza em operações de corte a altas velocidades. Esses aços são conhecidos por mais de um século. Sua descoberta pode ser atribuída a Robert F. MUSHET em, 1868, que, accidentalmente, percebeu que aços com elevados teores de tungstênio tornavam-se duros.

De acordo com a Villares Metals (2005) os aços rápidos são materiais para ferramentas, desenvolvidos para uso em aplicações de corte de metais em alta velocidade. Existem duas classificações: aços rápidos ao molibdênio (grupo M) com carbono na faixa de 0.75 a 1.52 % e molibdênio entre 4.50 a 11.0 %, e aços rápidos ao tungstênio (grupo T) que tem teores similares de carbono, mas altos teores de tungstênio, entre 11,75 e 21 %.

Os aços rápidos são classificados de acordo com a AISI, como aços ferramenta destinados à produção de ferramentas de corte, serras e bicos de bombas injetoras de motor. (COSTA; SILVA; MEI, 1988). O aço rápido AISI M2 é um aço rápido ao molibdênio, cujas principais aplicações são brocas helicoidais de alta qualidade, fresas de todos os tipos e ferramentas de corte em geral Villares (1998). Após as experiências de Maunsel e White da Bethlehem Steel Works em 1898 foram conhecidas as vantagens de temperar em temperaturas elevadas e posteriormente foram descobertos os benefícios do endurecimento secundário (ARAÚJO, 1993).

Conforme Cardoso (1999), os aços rápidos são caracterizados por apresentarem, após tempera e revenimento, uma microestrutura constituída basicamente

por carbonetos primários em matriz martensítica contendo carbonetos secundários. A quantidade de carbonetos variará de acordo com o tratamento térmico aplicado, o que influirá diretamente nas propriedades mecânicas e tribológicas do aço. Os tratamentos usualmente aplicados são recozimento e tempra seguida de revenimento.

Araujo (1999) destaca que a complexidade dos aços rápidos está relacionada com a quantidade de elementos de liga presentes, destacando-se o cromo, molibdênio, tungstênio e vanádio e em alguns casos, substancial quantidade de cobalto. CESCON (1990) caracteriza ainda o balanceamento entre o carbono e os demais elementos de liga objetiva, após tratamento térmico, a obtenção de elevada dureza, elevada resistência ao desgaste, elevada resistência ao amolecimento por calor e boa tenacidade para permitir a utilização efetiva em operações industriais de corte.

2.1.4 Defeitos geométricos em furos

Atualmente os desafios das empresas do ramo de usinagem são reduzir custos, aumentar a produtividade, possibilitar melhores acabamentos superficiais nas peças fabricadas e garantir precisão dimensional Ramji et al. (2010).

Os furos podem possuir defeitos Carvajal et al. (2011). As principais causas são o emprego de brocas desgastadas; a utilização de parâmetros de furação impróprios; elevadas temperaturas durante o processo de corte; desalinhamento do eixo arvore em relação à peça; e o excesso de força durante o processo de furação Kishore et al. (2011), Kudla, (2003) e Vasconcellos, Araújo (2011). A Fig. 2.6 mostra os principais defeitos mais comuns nos furos.

De acordo com Kaipakjian et al. (2007), no decorrer do processo de furação é inevitável que a saída do cavaco gerará modificações na superfície usinada. Uma broca relativamente afiada, que é empregada para furar materiais dúcteis, provocará uma pressão suficiente para romper as ligações atômicas ou moleculares, provocando um elevado número de discordâncias, sem produzir grandes deformações plásticas a distâncias da ordem de alguns micrômetros da zona de corte. Micheletti (1980) afirma que, quando se tem uma broca desgastada, comumente ocorre um processo de recalque, levando, desta forma, as gerações de tensões no material da peça que, juntamente com condições impróprias de trabalho, poderão comprometer a qualidade final do furo. Conforme Costa (2004), o excesso de vibração no sistema máquina-ferramenta, além da perda da aresta cortante da broca, colaborará para desvios dimensionais e de forma no furo.

Na indústria, a maioria dos furos é executadas ou aumentadas de diâmetro pelo processo de furação. Essa operação, em geral, é feita como uma das últimas a serem executadas na peça, quando uma grande quantidade de tempo e dinheiro já foi gasta na execução da mesma; por isso, torna-se indispensável maior controle desse processo para

garantir-se uma melhor qualidade do furo. (NOVASKI, 1994).

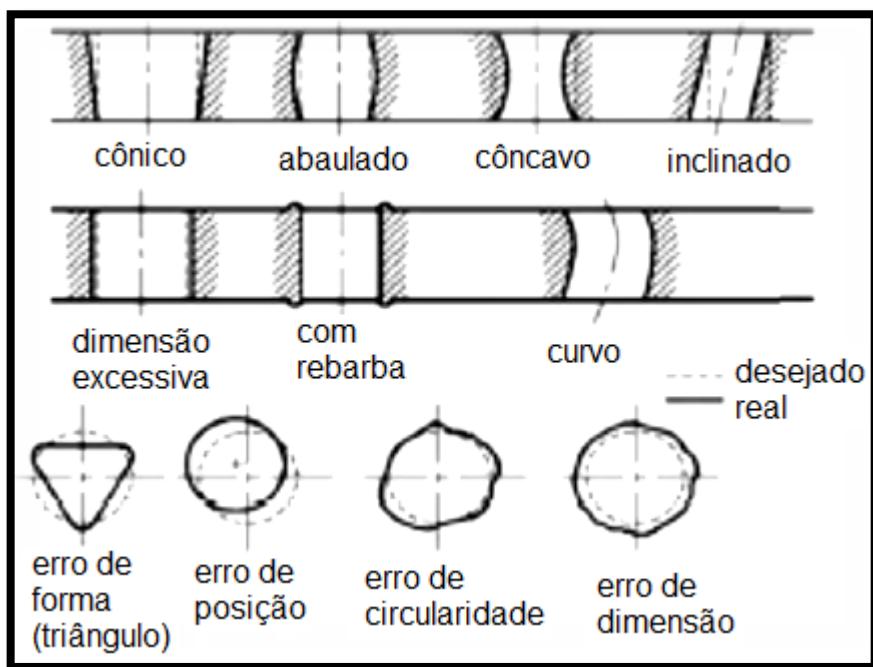


Figura 2.6 - Defeitos geométricos nos furos.

Fonte: Schroeter et al. (2004)

2.2 Aços Carbono e suas ligas

Os aços perfazem uma grande porcentagem dos materiais utilizados na indústria metálica, para as mais diversas aplicações, devido à suas boas propriedades mecânicas, grande disponibilidade e custo relativamente baixo. Apesar de alguns aços serem fácil de usinarem, a maioria dos metais desse grupo é de baixa usinabilidade. Talvez, um dos maiores problemas na usinagem dos aços é a produção de cavacos contínuos e, geralmente, longos. Outros fatores também contribuem para dificultar a usinagem, entre eles, o alto ponto de fusão, as altas temperaturas desenvolvidas na superfície das ferramentas (o que acontece a certa distância da aresta de corte) e as altas tensões de compressão. Por causa disto tudo, uma grande quantidade de pesquisa e publicações sobre a usinagem dos aços poderão ser encontrada na literatura. (MACHADO, et al. 2004).

Elementos de liga em aço (carbono, manganês, cromo etc.), aumentam a sua resistência. Isso influencia tanto os esforços que atuam sobre a ferramenta e as temperaturas geradas. Tal como acontece com o cobre e alumínio, o efeito de adições de elemento de liga no ferro é geralmente para reduzir as forças na ferramenta em relação ao ferro puro Fig.2.7. No entanto, o esforço necessário para o corte de metal sobre o plano de corte para formar o cavaco é maior. E quanto ao corte de aço, ao contrário do ferro, o cavaco é mais fino, o ângulo do plano de cisalhamento é maior e a área do plano de corte é muito menor. (TRENT; WRIGTH, 2000).

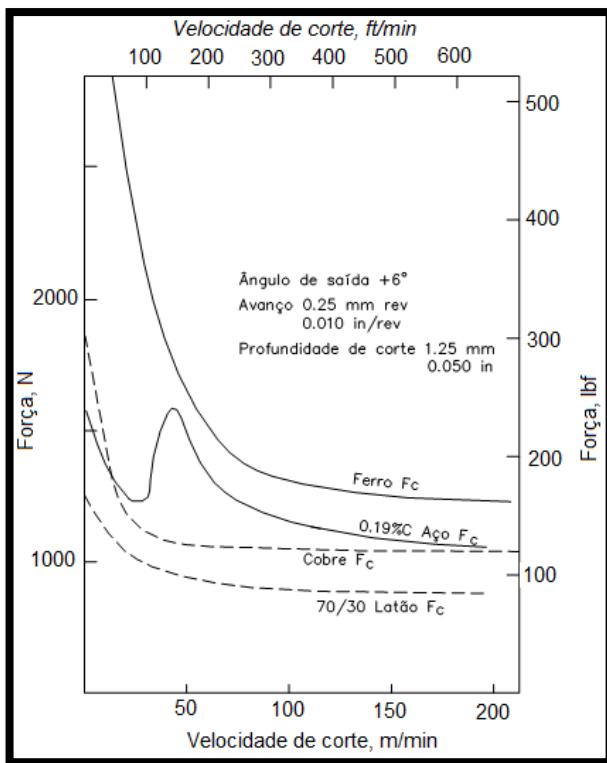


Figura 2.7 - Força versus a velocidade de corte do ferro, aço, cobre e latão.
Fonte: Trent e Wrigth, (2000).

2.2.1 Usinabilidade dos aços e suas ligas

Nos aços os vários constituintes microestruturais podem ser classificados em ordem crescente de dureza, da seguinte maneira. (MACHADO et al., 2009).

- a) Austenita;
- b) Ferrita;
- c) perlita grossa;
- d) perlita fina;
- e) bainita;
- f) martensita revenida (vários níveis de dureza);
- g) martensita; e
- h) cementita.

De acordo com Machado et al. (2009), como regra geral, o aço puro carbono, com teor de carbono menor que 0,3%, deverá estar em seu estado de maior dureza possível, para se obter uma boa usinabilidade. Isto será obtido quando ele for trefilado a frio e possuir uma granulação fina. Para altos teores de carbono (C > 7%) melhores resultados de usinabilidade serão obtidos quando a estrutura esferoidal estiver presente. Nos aços ligas, os elementos de liga são adicionados, geralmente, para aumentar a dureza e produzir

uma matriz mais resistente, tendo uma maior tendência ao encruamento. Do ponto de vista de usinabilidade os aços ligas produzirão melhores resultados que os aços comuns ao carbono (com o mesmo teor de carbono), quando à dureza daqueles forem menores que as dos aços comuns. (DINIZ et al., 2006).

Conforme Machado et al. (2009) adições de enxofre (juntamente com o manganês), chumbo ou telúrio levam à produção de aços de “corte-fácil”. Os aços desoxidadados com cálcio geram menos desgaste nas ferramentas de corte, do que quando a desoxidação é feita com o silício. O mecanismo preciso com que essas adições atuam, melhorando a usinabilidade, ainda não está totalmente esclarecido, mas elas permitem: velocidades de corte mais elevadas; proporcionam vidas de ferramentas maiores; excelentes acabamentos superficiais; baixas forças de corte; menores temperaturas de corte; baixas potências consumidas e melhor controle dos cavacos Mills e Redford, (1983).

Conforme Machado et al. (2009) as ferramentas mais empregadas na usinagem dos aços são os aços-rápidos e o metal duro. O limite de emprego das ferramentas de aço-rápido está na dureza de 300 HV do aço. Para as ferramentas de metal duro, este limite é maior, isto é, 500 HV. Quando se utilizam ferramentas de aço-rápido, uma cratera se desenvolve por difusão e cisalhamento plástico superficial Mills e Redford, (1983). À velocidades de corte mais elevadas, as ferramentas podem deformar-se plasticamente sobre tensão de compressão. Quando se usar metal duro WC + CO (classe K) com altas velocidades de corte, acontecerá o desenvolvimento rápido da cratera e do desgaste do flanco por difusão. Adições de TiC e TaC e NbC às ferramentas (classe P) aumentarão as suas vidas. A velocidades de corte mais elevadas, a deformação da aresta por tensão de compressão poderá acontecer e o mecanismo de *attrition* irá prevalecer a velocidades de corte baixas. (TRENT, 1984).

2.3 Desgastes e mecanismos desgastes em brocas

2.3.1 Mecanismos de desgastes

Konig e Klocke (1997) afirmam que os mecanismos de desgaste da ferramenta constituem um importante estudo no desenvolvimento de novas tecnologias. À medida que se entende melhor o mecanismo, torna-se possível ação no sentido de aumentar a vida da ferramenta. Define-se o desgaste em ferramentas de corte como uma perda gradual de material do corpo pela ação de contato físico da ferramenta com a peça e o próprio cavaco em um meio seco ou úmido, onde vários são os fenômenos causadores do desgaste.

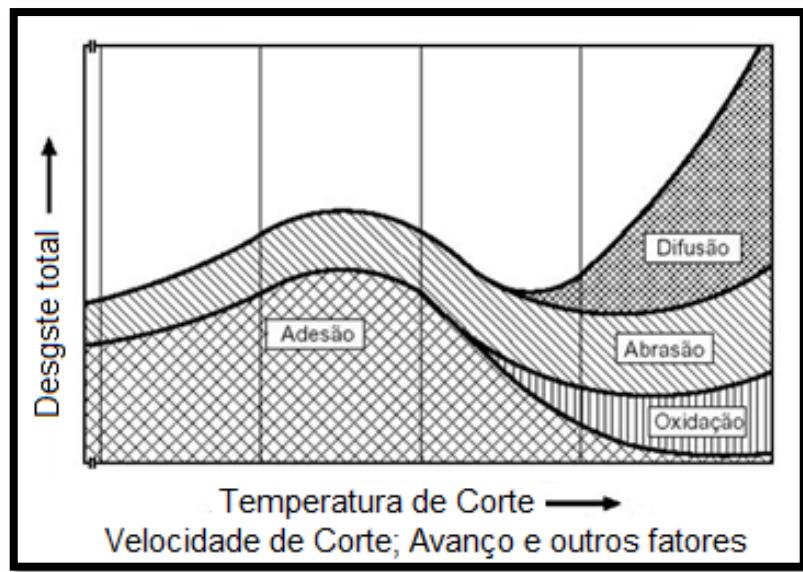


Figura 2.8 - Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgastes das ferramentas de corte.

Fonte: Konig e Klocke (1997).

Pode-se observar com base nesta Fig. 2.8 o comportamento e a alternância entre os mecanismos de desgaste predominantes, à medida que a temperatura de corte aumentar. Neste sistema tribológico fatores tais como o material da ferramenta e da peça, as condições de corte, a geometria da ferramenta e o meio lubri-refrigerante afetam a temperatura e a pressão na região de corte fazendo com que alguns mecanismos prevaleçam sobre os outros (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

Entre os principais agentes causadores do desgaste em ferramentas de corte podem-se citar a abrasão mecânica, a adesão, a difusão e a formação de óxidos. Machado et al. (2009), Diniz et al. (2006) definiram os principais mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte no processo de usinagem:

a) Abrasão

A abrasão é uma das principais causas de desgaste de ferramentas, tanto o desgaste frontal quanto o de cratera podem ser gerados por abrasão. O desgaste gerado pela abrasão é intensificado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte que reduz a dureza da ferramenta. Assim quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior sua resistência ao material abrasivo. Às vezes, partículas duras arrancadas de outras regiões da ferramenta por aderência ou mesmo por abrasão e arrastadas pelo movimento da peça, causam o desgaste abrasivo em uma área adjacente **da ferramenta**.

b) Adesão

O fenômeno da adesão ocorre geralmente em baixas velocidades e

temperaturas de corte, condições ideais para formação de aresta postiça, mas pode se ter desgaste por adesão mesmo sem a formação da mesma. Nas superfícies de contato da ferramenta, o corte interrompido, a profundidade de usinagem irregular ou a falta de rigidez promovem fluxos irregulares de cavaco, causando microcaldeamentos do cavaco à superfície de saída da ferramenta. O material, devido à solicitação intermitente, sofre a fadiga removendo parte da superfície de contato da ferramenta. Trent e Wright (2000) explicam que o fator mais significativo para ocorrência deste mecanismo de desgaste em ferramentas de metal duro é o tamanho de grão.

c) Difusão

A difusão consiste na transferência de átomos de um material para o outro, o que causa variações nas propriedades na camada superficial da ferramenta. Estas reações químicas provocarão a formação de compostos químicos menos resistentes à abrasão. Para que ocorra o desgaste por difusão são necessários três fatores combinados: elevadas temperaturas na região de contato, afinidade química entre a ferramenta e o material da peça e o tempo de contato König e Klocke (1997). A difusão é responsável pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte, pois na superfície de saída da ferramenta é que se tem a condição necessária para a difusão dos materiais, isto é, alta temperatura (devido a altas velocidades e a zona de aderência) e tempo de contato cavaco-ferramenta.

d) Oxidação

A oxidação ocorre na maioria dos metais em temperaturas elevadas na presença de ar e água. O desgaste gerado pela oxidação se forma nas áreas adjacentes de contato cavaco-ferramenta ou zona de escorregamento em forma de pequenas bolhas de óxido. No metal duro ocorre a formação de óxido de tungstênio, cobalto e ferro que levam ao lascamento da aresta de corte. A adição de carbonetos de titânio, tântalo e vanádio reduzem a oxidação do metal duro. (TRENT; WRIGHT, 2000).

2.3.2 Formas de desgaste e avarias em brocas

Conforme Bork (1995), na furação a variação de velocidade de corte ao longo da aresta principal de corte e a dificuldade em expulsar os cavacos da região de corte caracterizam geralmente como principal mecanismo de desgaste a abrasão mecânica. A medição do desgaste por abrasão é utilizada como um dos critérios para determinar o final da vida de uma ferramenta devido ao comportamento gradual do desgaste. Conforme mostrado na Fig. 2.9, o desgaste da ferramenta no processo de furação ocorrerá em diversas áreas como os flancos, as superfícies de saída do cavaco, aresta transversal, nas pontas e guias laterais da broca. Conforme a região onde ocorrer, identificar-se-ão cinco

tipos diferentes de desgaste.

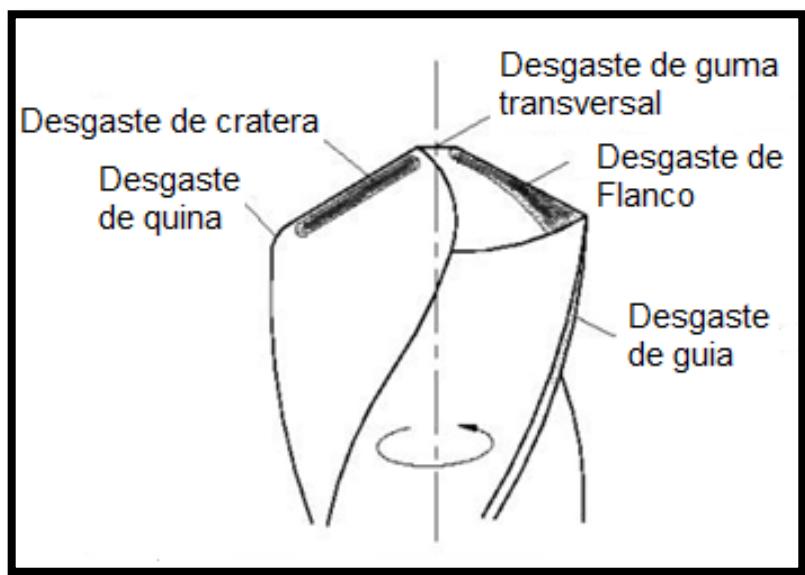


Figura 2.9 - Tipos de desgaste por abrasão em uma broca
Fonte: Bork (1995).

Segundo Castillo (2005), uma das regiões mais críticas na broca é a aresta transversal, que é onde ocorre o primeiro contato ferramenta/peça. Os esforços de compressão gerados pelo movimento de avanço associados à redução da velocidade de corte nesse ponto da ferramenta resultarão em um desgaste progressivo pelo esmagamento do material podendo causar lascamentos e consequente destruição da aresta transversal.

Schroeter et al. (1999) ressaltam que as pontas da broca, onde se encontra a aresta principal de corte com a secundária, é considerada outra região crítica. Nesta região, o desgaste ocorrerá com maior intensidade devido às solicitações térmicas relacionadas à maior velocidade de corte neste ponto da ferramenta e ao calor gerado pelo atrito dos cavacos e nas guias da ferramenta contra a parede do furo.

Castro (2001) explica que o desgaste das guias poderão aumentar o calor gerado devido a um maior atrito entre peça e ferramenta. Isto leva à dilatação térmica e a um crescimento radial da broca gerando o efeito de *Stick-slip*, ou seja: a guia adere e escorrega na parede do furo constantemente. Este fenômeno causará vibrações e trepidações no processo de corte, podendo levar à quebra catastrófica da ferramenta.

Teixeira (1995) afirma que o desgaste de cratera ocorre na superfície de saída da broca devido ao atrito gerado pela passagem do cavaco. A cratera é formada pela ação abrasiva dos cavacos (partículas duras) combinada às solicitações térmicas provocadas pelo calor gerado pelo atrito na superfície de saída e a difusão entre cavaco e ferramenta. O desgaste de cratera assim como o desgaste de flanco são uma das formas mais frequentes de desgaste, comumente utilizada como critério de fim de vida de uma ferramenta.

Schroeter et al. (1999) e colaboradores afirmam que o desgaste de flanco ocorre na superfície de incidência devido ao atrito das arestas de corte da broca contra a superfície da peça, considerado o desgaste mais comum em todos os processos de usinagem. O aumento do desgaste de flanco resultará em aumento dos esforços de corte, piora a qualidade da superfície do furo e aumenta os erros dimensionais e geométricos dos furos. A Fig. 2.10 mostra o desgaste de flanco.

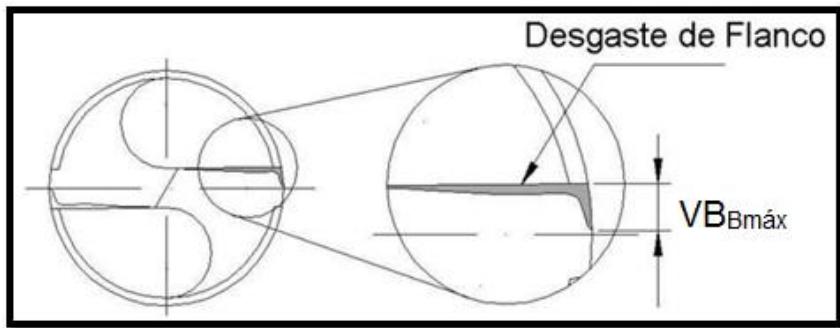


Figura 2.10 - Desgaste de flanco em brocas helicoidais.
Fonte: Schroeter et al. (1999).

A norma ISO 3885 (1977) recomenda os seguintes valores de desgaste para testes de vida de ferramentas de aço-rápido, metal duro e cerâmico:

- desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3 \text{ mm}$;
- desgaste de flanco máximo, $VB_{Bmáx} = 0,6 \text{ mm}$;
- desgaste de cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$; onde f é o avanço em mm/rev ; e
- falha catastrófica.

Kanai e Kanda (1979) distinguem as formas de desgaste que podem ocorrer em brocas helicoidais, conforme são mostradas na Fig. 2.11. Diferentes mecanismos poderão originar esses desgastes e a sua evolução se dará de forma semelhante na ponta da ferramenta. Teixeira (1995) e Castro (2001) ressaltam que nas zonas de corte predominam as solicitações térmicas provocadas pelo calor gerado pelo atrito dos cavacos na superfície de saída e pelo atrito das guias. Esse carregamento pode levar ao desgaste de cratera na ferramenta.

Teixeira (2001) destaca que, quando as formas de desgastes, apresentadas anteriormente, atingem valores exagerados, um critério é usado para controlar o fim de vida da ferramenta e manter o processo dentro de condições seguras e econômicas. Portanto, o fim de vida de uma ferramenta será determinado pelo grau de desgaste sofrido pela ferramenta durante o período de usinagem, entendendo-se por desgaste as alterações geométricas ocorridas na cunha cortante decorrentes do trabalho de corte.

Hélio et al. (2010) estudaram a influência do ciclo de furação na vida de brocas helicoidais e na qualidade geométrica dos furos, sendo que a vida da ferramenta foi quantificada em termos de números de furos usinados, e os ensaios foram realizados até que ocorresse o colapso da ferramenta, os resultados mostraram que a vida das brocas não tiveram influências significativas das variáveis estudadas.

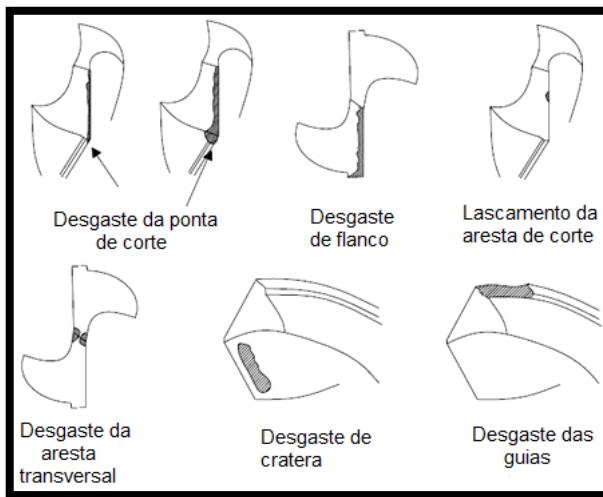


Figura 2.11 - Formas de desgaste em brocas helicoidais
Fonte: Kanai e Kanda, (1979).

2.4 Esforços de usinagem na furação

De acordo com Petrucci e Zuccarello (1998), a combinação de movimentos entre a broca e a peça gera uma série de esforços. Por conseguinte, estimar as forças que atuam no processo de furação é fundamental Almasi, (2010), Paiva Junior (2007), Huang (2009) afirma que os danos catastróficos que ocorrem nas brocas, normalmente são provocados pelo excesso de força durante a usinagem.

Machado et al. (2009) afirmam que as medições e estimativas das forças de corte presentes nos processos de usinagem são de grande importância por fornecerem informações para dimensionamento e projeto de máquinas-ferramentas, além do entendimento dos fenômenos na região de corte, dos fenômenos de formação de cavaco e dos mecanismos de desgaste e determinação das condições de corte Ferraresi, (1977), Sandvik, (1994), Konig e Klock, (1997).

Os principais fatores que influenciam as forças de corte são Tocshoff, (1994), Konig, (1997) e Castro (2001):

- Material da peça;
- Revestimento da ferramenta;
- Geometria da ferramenta de corte;

- d) Parâmetros de corte;
- e) Tipo e pressão do fluido de corte; e
- f) Desgaste da ferramenta.

Wiercigroch et al. (1998) afirmam que a medição das forças durante o processo de furação pode ser realizada com auxílio de dinamômetros ou por meio de células de carga. Na fig. 2.12 é possível, serem visualizadas as forças que atuam nas brocas helicoidais durante o processo de furação.

Conforme Silva (2010), uma broca helicoidal, durante o processo de furação, é submetida a esforços de torção, em função da rotação da broca e a esforços de compressão devido ao avanço da broca durante o corte. Desta maneira, para estimar os esforços na operação de furação, bastará calcular-se o torque e a força de avanço do processo.

2.4.1 Forças de usinagem

Segundo Castillo (2005) o estudo das forças aplicadas na broca pode ser abordado, considerando-se separadamente as seguintes variáveis que atuarão durante o processo de furação:

- a) Forças decorrentes do atrito nas guias;
- b) Forças aplicadas sobre as arestas principais;
- c) Forças que agem sobre a aresta transversal.

A força de usinagem (F), que atua na aresta principal de corte durante a usinagem, pode ser decomposta em três componentes: força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p). A Fig. 2.12, mostra a direção das componentes da força de usinagem para o processo de furação. A força de corte F_c é decorrente da resistência ao corte do material usinado, que é predominantemente a responsável pelo momento torçor gerado no processo.

Segundo Konig e Klock (1997), a definição dos termos a seguir se refere a cada termo identificado na Figura 2.12.

- F – Força de Usinagem;
- F_c – Força de Corte nas Arestas Principais;
- F_f – Força de Avanço nas Arestas Principais; e
- F_p – Força Passiva nas Arestas Principais;

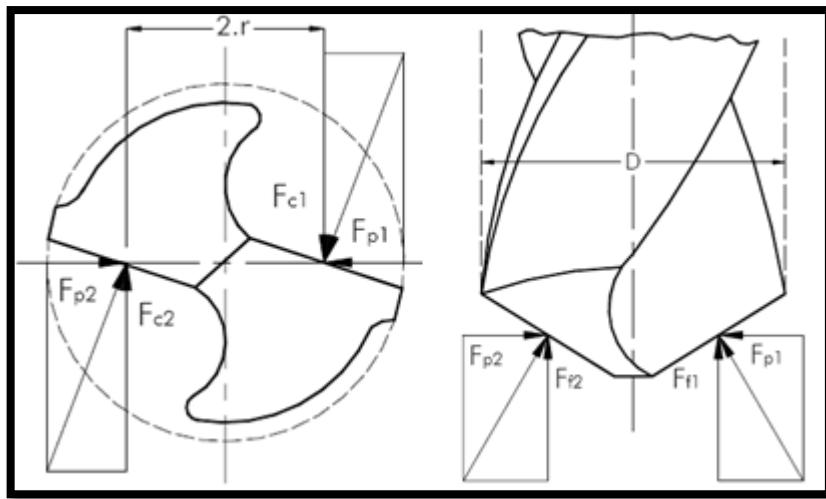


Figura 2.12 - Forças atuantes nas brocas helicoidais durante a usinagem.
Fonte: Konig e Clock (1997).

As forças passivas F_p atuantes nas duas arestas principais anulam-se mutuamente devido à simetria das arestas principais em relação ao eixo central. A falta de simetria poderá ocasionar forças passivas de intensidades diferentes, que causam a flexão da broca durante o processo Konig (1997). Conforme Micheletti (1980), a força de corte tem de estar na direção da velocidade de corte, força passiva na direção perpendicular ao plano de trabalho.

A força de corte atua em cada um das arestas cortantes e é decorrente principalmente da resistência ao corte do material usinado, tendo grande influência sobre o momento torçor que atua na furação. (STEMER, 2001).

A força de corte por gume pode ser dada pela Eq. (2.6):

$$F_c = K_c \cdot \frac{f \cdot d}{4} \quad (2.6)$$

Onde: F_c = Força de corte em (N);

K_c = Pressão específica de corte (N/mm^2);

f = Avanço (mm/rot); e

d = Diâmetro da broca (mm).

A força de avanço (F_f) é a resultante da soma das parcelas das reações ao avanço da aresta de corte e da aresta transversal Eq. (2.7). Como a aresta transversal atua no sentido de extrudar material para as arestas principais, a parcela da respectiva força de avanço nessa aresta poderá ser igual ou até mesmo maior que a força de avanço das arestas principais de corte. A maior parcela da força de avanço F_f é devido à resistência ao corte do material (penetração da ferramenta) no sentido do avanço Schroeter et al. (2004). Esta força surge principalmente devido à ação da aresta transversal, quando este apresenta um corte deficiente. Geralmente com uma contribuição ao momento torço inferior a 2%,

provocará o esmagamento do material, empurrando-o para a região das arestas principais. Sua influência à resistência ao avanço é muito maior, podendo alcançar valores da ordem de 50% da força de corte Micheletti (1980). É importante conhecê-la para se ter certeza de que o eixo da máquina será capaz de suportar a operação Sandvik (1994), Castro (2001), Teixeira (1995).

$$F_f = K_f \cdot \frac{f \cdot d \cdot \operatorname{sen} \frac{\sigma}{2}}{2} \quad (2.7)$$

Onde:

F_f = Força de avanço em (N);

K_f = Pressão específica de avanço (n/mm²);

f = Avanço (mm/rot);

d = Diâmetro da broca (mm);

σ = Ângulo de ponta da ferramenta (grau).

De acordo com Micheletti (1980), os valores de resistência ao avanço dos materiais, durante o processo de furação, são influenciados pelo comprimento e pela inclinação da aresta transversal. Na furação do aço, por exemplo, o aumento do comprimento da aresta de corte ocasionará num incremento da força de avanço, entretanto, esse incremento é mais modesto no ferro fundido e praticamente nulo para ligas de alumínio e latão.

2.4.2 Torque

No processo de furação a broca é submetida à torção Bordin et al. (2011). Na usinagem, a torção é gerada pela resistência de uma superfície ao corte. (FERRARESI, 1997). Durante a operação de furação a torção é originada pelo contato entre a peça e as arestas de corte; o esmagamento do material; e o atrito gerado nas paredes do furo. A Eq. (2.8) demonstra a formula de KRONENBERG, utilizada para calcular o momento torçor. (ALMEIDA, 2010; DINIZ et al., 2006).

As forças atuantes nas arestas principais da ferramenta são responsáveis pelo momento torçor, contribuindo entre 70% e 90% do valor do mesmo (STEMMER, 2001). O momento poderá ser então estimado através da Eq. (2.8):

$$M_t = K_c \cdot \left(\frac{f \cdot d^2}{8000} \right) \quad (2.8)$$

Onde:

M_t = Momento torsor (N/mm);

K_c = Pressão específica de corte (N/mm²);

f = Avanço (mm/rot); e

d = Diâmetro da broca (mm).

Uma informação importante na prática diz respeito à energia necessária para usinar determinado material sob determinadas condições de corte. A potência necessária para a usinagem poderá ser então calculada, utilizando-se o momento, sendo a resultante do produto deste e a velocidade angular da ferramenta Stemmer (2001), Sandvik (1995) e Konig (1997), conforme a Eq. (2.9).

$$P_c = \frac{M_t \cdot n}{9,549} \quad (2.9)$$

Onde:

P_c = Potência de corte em (kW);

M_t = Momento torçor (N.m); e

n = Rotação da ferramenta (rpm).

2.4.3 *Medições de esforços na furação*

Em ensaios experimentais, as medições das componentes da força de furação são normalmente feitas com o emprego de dinamômetros especificamente projetados para esta finalidade. Atualmente os sistemas mais conhecidos são os que utilizam transdutores de força piezelétricos, que constituem as chamadas plataformas piezelétricas. Esses sistemas utilizam as propriedades de certos materiais, como os de quartzo e de turmalina, de um sinal elétrico proporcional à deformação sofrida devido a um determinado carregamento. A utilização prática desse efeito ocorrerá através da amplificação e digitalização desse sinal elétrico, permitindo assim uma análise e tratamento matemático através de um software apropriado Tönshoff (1994). A Fig. 2.13 mostra esquematicamente a infraestrutura utilizada para a realização dos ensaios de aquisição de esforços.

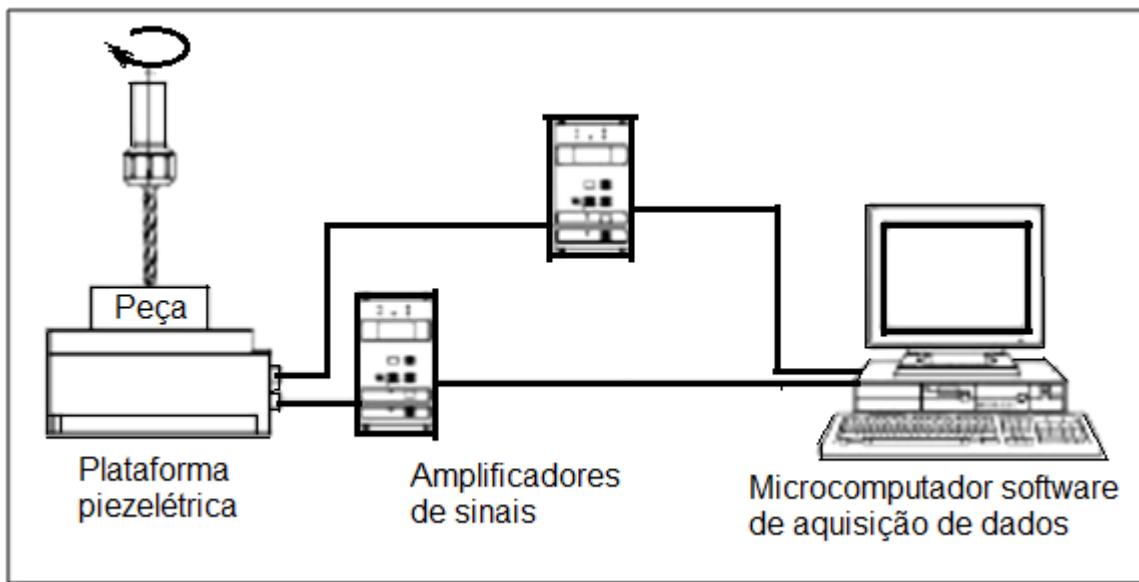


Figura 2.13 - Medição de forças com plataforma piezelétrica.

Fonte: Schroeter (1999).

A maioria dos dinamômetros existentes pode medir diretamente a força de avanço (F_t) e o momento gerado no processo (M_t) a partir do qual poderá ser calculada a força principal de corte (F_c) pela Equação (2.10) Tonshoff (1994).

$$F_c = \frac{2000 \cdot M_t}{d} \quad (2.10)$$

Onde:

F_c = Força de corte (N);

M_t = Momento torçor (N.m); e

d = Diâmetro da broca (mm).

2.5 Fluidos de corte

De acordo com El Baradie (1996), a seleção e aplicação de fluidos de corte na indústria nem sempre foram realizadas de forma ideal. Quando aplicados corretamente, fluidos de corte poderão aumentar a produtividade e reduzir os custos, tornando possível o uso de altas velocidades de corte, maiores taxas de avanço e profundidades de corte maiores. Aplicação eficaz de fluidos de corte poderá também aumentar a vida da ferramenta, diminuir a rugosidade da superfície, aumentar a precisão dimensional e diminuir a quantidade de energia consumida.

Segundo Nageswara (2007), a utilização de fluidos de corte é bem reconhecida há vários anos. Para atender às necessidades dos processos de estado da arte de usinagem, várias formulações de fluidos estão disponíveis no mercado hoje. De tais fluidos

disponíveis os fluidos solúveis em água são dominantes. No entanto, a necessidade de fluidos de corte é bastante explorada, isto enquanto a funcionalidade dos diferentes ingredientes não for muito investigada.

Diniz et al. (2003) afirmam que, nos processos de usinagem, a formação do cavaco gera uma grande quantidade de energia devido ao atrito ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. A fim de minimizar o desgaste da ferramenta, a dilatação térmica da peça e o dano térmico à estrutura superficial da peça, esse calor deverá ser reduzido (lubrificação) e/ou extraído (refrigeração) da ferramenta e da peça.

Para redução desse calor gerado são utilizados os chamados fluidos de corte. De acordo com El Baradie (1996), a utilização deste agente nos processos de usinagem prolonga a vida útil da ferramenta uma vez que o material da ferramenta possui dureza superior e menor taxa de difusão de seus constituintes em menores temperaturas de trabalho.

Em 1984, Frederick Winslow Taylor observou que, aplicando-se grande quantidade de água na região de corte, seria possível aumentar a velocidade de corte em 33%, sem prejuízo para a vida da ferramenta Ruffino (1977). Desde então, grandes avanços tecnológicos foram obtidos, tanto no que diz respeito aos materiais quanto no que se refere às máquinas-ferramentas, fazendo-se com que a demanda por fluido de corte crescesse consideravelmente Machado et al. (2009).

Trent e Wrigth (2000) ressaltam que os fluidos de corte são usados quando se desejar refrigerar a região de corte, principalmente em altas velocidades de corte; lubrificar a região de corte, principalmente em baixas velocidades e altas tensões de corte; reduzir a força de corte; aumentar a vida da ferramenta, o acabamento superficial e a precisão dimensional da peça. Além disso, eles ainda auxiliam na quebra do cavaco, facilitam o transporte de cavaco e protegem a superfície usinada e a máquina-ferramenta contra oxidação.

Pereira et. al. (2005) destacam que os fluidos de cortes entre os anos 2000 e 2005 apresentaram excelentes propriedades refrigerantes e lubrificantes; além disso, representam menos risco ao operador e levam mais tempo para se degradar, com menos problemas de descartes do que os fluidos de corte de gerações passadas, isso graças aos avanços conseguidos nos processos de fabricação dos fluidos pelo desenvolvimento de novos aditivos.

Conforme Gomes et al. (2005) e Alves (2007), para ser considerado ambientalmente correto, um fluido de corte deve ter características de biodegradabilidade, ser fisiologicamente seguro e não ser tóxico. O uso deve limitar-se a emissões reduzidas e controladas, mas com bom desempenho durante o processo de usinagem.

2.5.1 Funções do fluido de corte

Na operação de usinagem de metais é importante enfatizar-se a relação dos fluidos de corte com duas variáveis: a uniformidade do corte e o prolongamento da vida útil da ferramenta e não menos importante a velocidade da operação. (TRENT, 1984).

De acordo com Freire (1989), o princípio básico dos trabalhos em metais é uma operação de cisalhamento pela pressão exercida sobre eles, com a ferramenta de corte, sobre uma camada superficial da peça.

Nageswara e Srikant (2007) afirmam que um problema típico em operações com metal é o excessivo aquecimento que deforma a peça provocando imperfeições no trabalho, decorrentes do arrancamento de partículas metálicas das camadas abaixo do corte, e em virtude deste calor estas partículas se soldam à parte cortada. Oliveira e Alves (2006) concordam com Nageswara e Srikant (2007). Afirmam que outro problema em consequência desse superaquecimento é a diminuição da vida útil da ferramenta, necessitando de frequentes afiações na mesma.

O diagrama da Fig. 2.14 apresenta as funções principais do fluido de corte e sua atuação na peça, na ferramenta e na máquina-ferramenta.

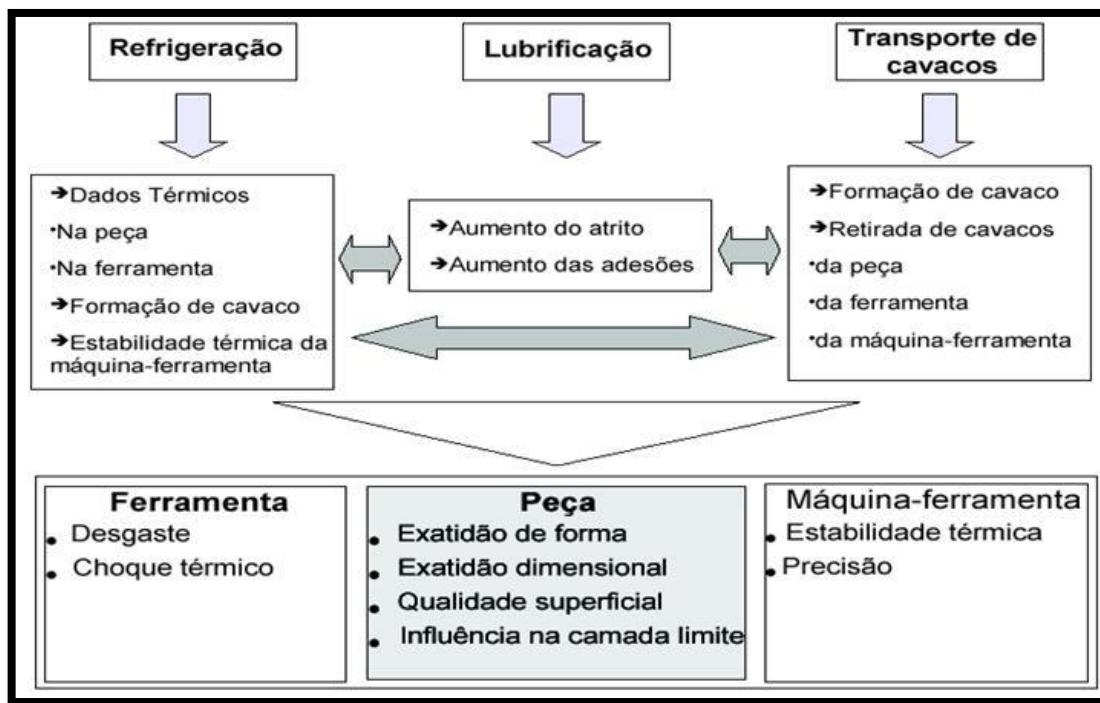


Figura 2.14 - Diagrama das funções dos fluidos de corte.
Fonte: Adaptado de Nageswara e Srikant (2007).

A função do fluido de corte é introduzir uma melhoria no processo de usinagem dos metais. A melhoria poderá ser de caráter funcional ou de caráter econômico. (NAGESWARA; SRIKANT, 2007).

As melhorias de caráter funcional são aquelas que facilitam o processo de usinagem, conferindo assim um desempenho melhor que pode-se destacar (DINIZ et al., 2006; MACHADO et al., 2009):

- a) Redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco;
- b) Expulsão do cavaco da região de corte;
- c) Refrigeração da ferramenta;
- d) Refrigeração da peça em usinagem;
- e) Melhor acabamento superficial da peça em usinagem; e
- f) Refrigeração da máquina-ferramenta.

As melhorias de caráter econômico são aquelas que induzem a um processo de usinagem mais econômico. Entre estas melhorias distinguem Diniz et al. (2006); Machado et al. (2009) as seguintes:

- a) Redução do consumo de energia de corte;
- b) Redução do custo da ferramenta na operação; e
- c) Impedimento da corrosão da peça em usinagem.

2.5.2 Razão para utilização do fluido de corte

De acordo com Dias (2000), o objetivo final de usar-se fluido de corte é reduzir o custo total por partes usinadas ou então aumentar a taxa de produção. Isto poderá ser conseguido com um ou mais dos seguintes benefícios que os fluidos de corte podem proporcionar. A saber:

- a) Aumento da vida da ferramenta pela lubrificação e refrigeração;
- b) Redução das forças de corte devido à lubrificação, portanto redução de potência;
- c) Melhora no acabamento superficial da peça;
- d) Fácil remoção do cavaco da zona de corte; e
- e) Menos distorção da peça pela ação refrigerante.

De acordo com Machado e Diniz (2000), além das funções acima citadas, os fluidos de corte devem possuir propriedades como: antiespumantes, anticorrosivas, antioxidantes, antidesgaste e antisolda (EP); boa umectação; capacidade de absorção de calor; transparência e inodoro; não formar névoa nem provocar irritações na pele; compatibilidade com o meio ambiente; índice de viscosidade apropriado.

Para conferir aos fluidos de corte melhorias em propriedades específicas, alguns produtos químicos ou orgânicos, chamados de aditivos, são adicionados: Os principais são Machado, et al. (2009); Mota, Machado, (1995); Oliveira, Alves, (2006); Rufino, (1977):

- a) Antiespumantes:** Evitam a formação de espumas que poderiam impedir a boa visão da região de corte e comprometer o efeito de refrigeração do fluido. Estes aditivos reduzem a tensão interfacial do óleo de tal maneira que bolhas menores passam a se agrupar formando bolhas maiores e instáveis. No controle das espumas geralmente usam-se ceras especiais ou óleos de silicone;
- b) Anticorrosivos:** Protegem peça, ferramenta e máquina-ferramenta da corrosão. São produtos à base de nitrito de sódio ou que com ele reagem, óleos sulfurados ou sulfonados. É recomendável usar o nitrito de sódio com precaução, pois são suspeitos de serem cancerígenos. Devem-se usar baixos teores de nitrito de sódio;
- c) Detergentes:** Reduzem a deposição de lodo, lamas e borras. São compostos organometálicos contendo magnésio, bário, cálcio entre outros;
- d) Emulgadores:** São responsáveis pela formação de emulsões de óleo na água e vice-versa. Reduzem a tensão superficial e formam uma película monomolecular semi-estável na interface óleo-água. Os tipos principais são os sabões de ácidos graxos, as gorduras sulfatadas, sulfonatos de petróleo e emulgadores não iônicos;
- e) Biocidas:** Substâncias ou misturas químicas que inibem o desenvolvimento de microorganismos;
- f) Aditivos de extrema pressão (EP):** Em operações mais severas, onde uma lubrificidade adicional será necessária, poder-se-ão utilizar aditivos extrema pressão. Eles conferem aos fluidos de corte uma lubrificidade melhorada para suportarem as elevadas temperaturas e pressões do corte, reduzindo o contato metal-metal. São compostos que variam na estrutura e composição. São suficientemente reativos com a superfície usinada, formando compostos relativamente fracos na interface, geralmente sais (fosfato de ferro, cloreto de ferro, sulfeto de ferro, etc.) que se fundem a altas temperaturas e são facilmente cisalháveis. Podem ser relacionados em ordem crescente de eficiência como: matérias graxas e derivados, fósforo e zinco, clorados, sulfurizados inativos, sulfurizados ativos, sulfurados e os sulfoclorados. Os mais empregados são aditivos sulfurizados, sulfurados e fosforosos.

2.5.3 Classificação dos fluidos de corte.

Segundo Silva e Bianchi (2000), existem diversas formas de classificar os fluidos de corte, entretanto, não há uma padronização. Embora a utilização de fluidos de corte gasosos e sólidos seja eventualmente descrita na literatura técnica, os fluidos de corte líquidos representam a grande maioria nas aplicações em operações de usinagem. Conforme Thomé et al. (2007), o fluido de corte gasoso mais comum é o ar comprimido, cuja função restringe-se à expulsão dos cavacos da região de corte, visto que a temperatura ambiente, o ar possui capacidades refrigerante e lubrificante mínimas. Dessa forma, os fluidos líquidos mais comuns são agrupados na seguinte categoria, de acordo com a classificação Machado et al. (2009), Alves e Oliveira (2006), Catai e Bianchi, (2006):

- a) Óleos:** Os óleos vegetais e animais foram os primeiros lubrificantes empregados como óleos integrais na usinagem dos metais. A utilização destes, como fluidos de corte, tornou-se inviável devido ao alto custo e rápida deterioração, porém são empregados como aditivos nos fluidos minerais objetivando melhorar as suas propriedades lubrificantes.
- b) Emulsões:** Apresentam duas fases: uma fase contínua, consistindo de pequenas partículas de óleo mineral suspensos na água (segunda fase); esta mistura é possível com a adição de agentes emulsificadores, ou seja: que ajudam a formar as gotículas de óleo que ficam dispersas na água. São usados aditivos anticorrosivos, biocidas, elementos EP e antidesgaste. Usam-se ainda gorduras e óleos (animal e vegetal) para melhorar as propriedades de lubrificação. Os fluidos semisintéticos (microemulsões) são também formadores de emulsões. Eles se caracterizam por apresentar aditivos e compostos químicos e uma menor quantidade de óleo mineral ou vegetal, o que lhes confere uma coloração menos leitosa e mais transparente. São também acrescentados aditivos como nos fluidos anteriores;
- c) Soluções:** São compostos monofásicos de óleos dissolvidos completamente na água. Os compostos reagem quimicamente formando fases únicas o que dispensam o uso de elementos emulgadores. Pertencendo à classe das soluções, encontram-se os fluidos sintéticos, que se caracterizam por serem livres de óleo mineral em sua composição. São adicionados vários aditivos (lubrificidade, biocidas, inibidores de corrosão), sais orgânicos e inorgânicos com água. Os óleos mais complexos são de uso geral, com boas propriedades refrigerantes e lubrificantes. Quando os fluidos sintéticos contêm apenas inibidores de corrosão, e as propriedades EP não são necessárias são chamados de refrigerantes químicos ou soluções verdadeiras.

2.5.4 Direção de aplicação dos fluidos de corte

Machado et al. (2009) e Diniz et al. (2006) concordam ao afirmarem que não há um consenso em relação à melhor direção de aplicação do fluido de corte. Para Machado et al. (2009), a direção “A” (sobre - cavaco) é a mais tradicional, provavelmente pelo fato de os primeiros sistemas de aplicação serem rígidos e possuírem poucos graus de liberdade, dificultando assim aplicação em outras direções. Machado et al. (2009) acrescentam ainda que a direção “B” apresenta a desvantagem de aplicação do fluido no sentido contrário ao movimento do cavaco, sendo recomendada quando o fluido é aplicado sob elevada pressão. Estes mesmos pesquisadores obtiveram bons resultados utilizando a direção “B” (superiores à direção “A”) no torneamento da liga de titânio, quando aplicou o fluido de corte a alta pressão.

A direção C de aplicação do fluido de corte apresenta a vantagem de atingir diretamente a interface ferramenta/peça, reduzindo, assim, o desgaste de flanco e contribuindo para a qualidade da superfície usinada Machado et al. (2009).

Essas 4 direções de aplicação dos fluidos de corte são mostradas na Figura 2.15.

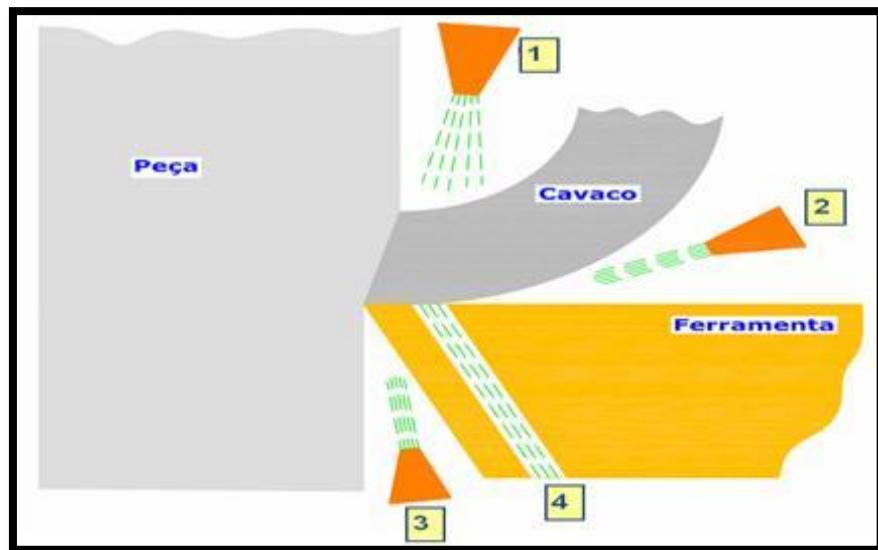


Figura 2.15 - Direções possíveis de aplicação do fluido de corte.
Fonte: Sousa (2011).

Os fluidos podem ser aplicados sob diversas direções, vazões, posicionadas na interface cavaco-ferramenta ou na peça. As formas tradicionalmente empregadas são, segundo Ferraresi (1977); ASM INTERNACIONAL (1989), Drozda e Wick (1993):

- a) **Aplicação externa:** Devido à baixa modernização do parque fabril brasileiro esta é a aplicação mais encontrada nas linhas de produção. (TEIXEIRA,

2001). Nesta aplicação, através de um jato externo, o fluido é direcionado convenientemente para a região de interação entre a ferramenta e a peça;

- b) Jorro fluido a baixa pressão, ou por gravidade:** Este sistema é o mais usado pela sua simplicidade. O fluido é jorrado contra a superfície do cavaco, ou ainda na superfície de saída da ferramenta;
- c) Sistema a alta pressão:** A eficiência da aplicação do fluido de corte a alta pressão se mostrou de forma bastante positiva quando desempenhando a função de quebra cavaco. (NAVES et al., 2011). Os comprimentos dos cavacos tornavam-se menores quanto maiores pressões eram aplicadas, permitindo formas bastantes descontínuas o que facilitou sua remoção e transporte do local onde o mesmo era gerado.
- d) Mínima Quantidade de Fluido (MQF) – Pulverização:** está entre a usinagem com refrigeração e a sem refrigeração, onde gotas de fluido são lançadas na área de corte para produzirem um filme de lubrificante protetivo, quase a seco, uma quantidade mínima de fluido, dirigida por um jato de ar ao ponto onde está sendo executada a usinagem. O volume de fluido poderá variar em função do volume de cavacos e do processo de usinagem e os fluidos lubrificantes deverão ter altíssima taxa de remoção de calor; além disso, a mínima quantidade de fluido deverá ser suficiente para reduzir o atrito da ferramenta e evitar a aderência dos materiais. (OLIVEIRA, 2008).
- e) Aplicação interna:** Para fazer o fluido de corte chegar até a zona de corte poderão ser utilizados canais convenientemente preparados nos suportes e/ou nas ferramentas. Esta forma de aplicação permite obter uma excelente penetração do fluido nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça. Porém, o emprego desta técnica exige condições e características apropriadas no conjunto máquinas-ferramentas, suportes e ferramentas de corte, de modo a permitir a circulação dos fluidos até a zona de corte. Tudo isso se traduz em maiores custos dos equipamentos e exigem maiores cuidados com o ferramental. (TEIXEIRA, 2001).

Bezerra (2003) e Costa et al. (2004) afirmam que as limitações das operações a seco podem ser reduzidas através da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) que age com base no princípio de utilização de pequenas quantidades de óleo de corte sem resíduos. Nesta tecnologia a função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração, mesmo que pequena, pelo ar comprimido. Esta pequena quantidade de fluido é suficiente para reduzir o atrito no corte, diminuindo a tendência à aderência em materiais com tais características.

2.5.5 Fluidos de corte como refrigerante

É de suma importância a ação dos fluidos de corte como refrigerantes, pois eles diminuem a temperatura de corte, tanto pela diminuição da geração de calor (lubrificação), como também pelo aumento da dissipação do calor (refrigeração). (Machado et al., 2009).

Trent (1984); Silva et al. (1999) destacam que a refrigeração da ferramenta é especialmente importante em altas velocidades de corte. Quando se utiliza ao máximo as possibilidades da ferramenta e a temperatura do gume se aproxima do ponto de amolecimento, pequeno resfriamento poderá provocar grande aumento na vida da ferramenta. Assim, num ensaio sob determinadas condições de corte, o abaixamento da temperatura de 700°C para 650°C provocou um aumento de vida de 4 para 20 minutos e uma nova redução de temperatura para 600°C elevou a vida da ferramenta para várias horas.

2.5.6 Fluidos de corte como lubrificante

Teixeira Filho et al. (2001) afirmam que a lubrificação promove a redução do coeficiente de atrito cavaco-ferramenta (principalmente) e ferramenta-peça, reduzindo força total, potência de corte e temperatura. O fluido deve penetrar entre as superfícies em contato por capilaridade, ajudado pela vibração peça cavaco-ferramenta, se não chegar à região de corte não terá efeito lubrificante. Deve suportar altas pressões (sem vaporizar). Quanto maior a velocidade de corte (e do cavaco) mais difícil à lubrificação.

Segundo Stemmer (1987), a lubrificação atua sobre uma pequena parcela do calor gerado. Indiretamente, porém, verifica-se que a lubrificação diminui o fator de recalque do cavaco e, com isto, reduz, também, o trabalho de dobramento do cavaco. Tem sido muito discutido o mecanismo de atuação do fluido lubrificante, uma vez que a existência de pressões de contato entre cavaco e superfície de saída, da ordem de 2700 MPa e temperaturas por vezes superiores a 600°C tornará de todo impossível a hipótese de lubrificação hidrodinâmica, com formação de uma cunha de óleo semelhante à que ocorre em mancais. Para Stemmer (2005), a viscosidade do lubrificante não tem nenhum efeito sobre o coeficiente de atrito. Uma explicação do mecanismo de lubrificação é a seguinte: as superfícies do cavaco e da peça não são absolutamente planas, mas apresentam irregularidades, nas quais poderá penetrar o fluido de corte por capilaridade ou outra ação mecânica.

2.5.7 Fluidos de corte de base vegetal

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, possibilitará a eliminação dos problemas dos óleos vegetais de antiga tecnologia, como a resinificação, a viscosidade aumentada e o desenvolvimento de acidez. (WOODS, 2005).

Conforme Ehran e Asadauskas (2000), na última década, a indústria vem tentando formular lubrificantes biodegradáveis com características superiores dos usuais baseados em óleo mineral. Eles acreditam que 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.

Campanella (2010) destacam que as 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 esses 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 forem submetidos a modificações químicas em sua estrutura, passarão a ser uma alternativa mais viável de uso.

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 podem ser destacadas conforme Farias (2002):

- a) 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;
- b) Têm moléculas polares que funcionam como se fossem ímãs e se alinharam à superfície do metal, formando um filme lubrificante capaz de suportar grandes tensões superficiais, facilitando a usinagem e melhorando a vida das ferramentas. As moléculas dos óleos minerais não são polares e por esse

motivo a sua capacidade lubrificante é inferior à dos óleos vegetais (ver Fig. 2.16). Isso também é uma vantagem quando se deseja maior produtividade.

c) 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 Kuroda (2006).

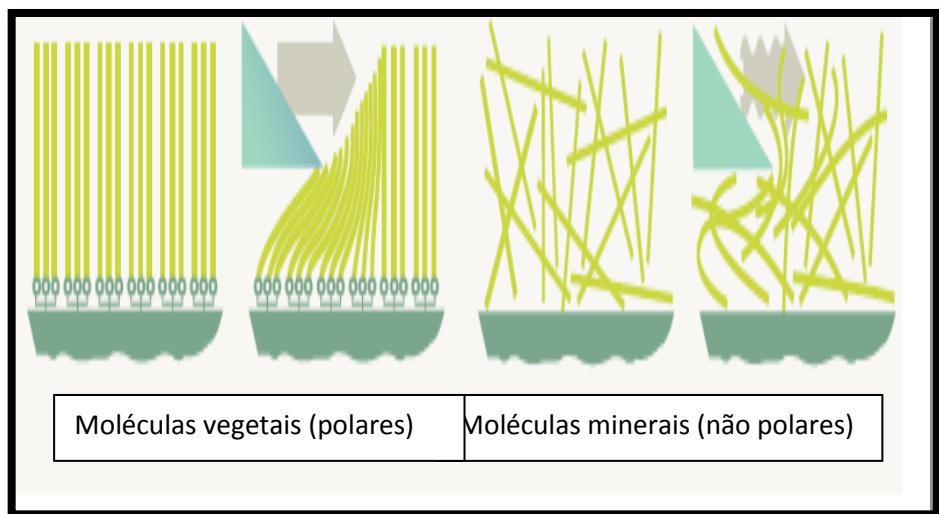


Figura 2.16 - Lubrificabilidade dos óleos vegetais e dos óleos minerais.
Fonte: Kuroda (2006).

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

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

Segundo Silliman (1992) nos diz que 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. 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. Para Silliman (1992), 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. Já 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.

Sheng e Oberwalleney (1997) afirmam que, 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 a sua biodegradabilidade; entretanto, esta mesma característica confere aos óleos vegetais maiores propensão a degradação microbiológica do que os óleos derivados de petróleo.

De acordo com 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 a base de ésteres sintéticos ou naturais são facilmente biodegradáveis em contraste com os óleos minerais.

Suda et al. (2002) afirmam que 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.

Oliveira e Alves (2006) destacam que, buscando por fluidos de corte com características de biodegradabilidade, isenção de toxicidade e segurança fisiológica, 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 a outros fluidos comerciais à base de água e semelhante ao do óleo mineral com relação ao desgaste do rebolo e qualidade superficial da peça. Então, depois de analisado quimicamente, foi considerado facilmente biodegradável. Oliveira e Alves (2006) no desenvolvimento desse novo fluido de corte, propuseram uma fórmula, a partir de óleo vegetal 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. Para testar a biodegradabilidade do novo produto foi utilizado o método Ready Biodegradability: 301B CO₂ Evolution Test e 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.

No que se refere ao desenvolvimento de novos tipos de fluidos de corte, 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 essa 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, observa-se uma tendência de reformulação na composição dos fluidos de corte, de forma a eliminar de suas fórmulas os produtos tóxicos. (TEIXEIRA; SCHROETER; WEINGAERTNER, 2005).

Kuroda (2006) afirma que 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 se verificar 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.

2.5.8 Vantagens e desvantagens dos fluidos vegetais

Ganier (1993) afirma que a escolha de um fluido de corte adequado não é uma tarefa simples, por causa da diversidade de produtos disponíveis no mercado com elevado nível de competitividade. Machado e Diniz (2000) afirmam que o valor de aquisição do fluido é alto e seu uso deve compensar financeiramente, ou seja: o custo do produto tem que ser superado pelos benefícios que ele propicia. Um exemplo prático é no torneamento e fresamento de ferro fundido cinzento Trent (1984). Na usinagem com ferramentas de geometria definida a aplicação do fluido de corte é essencial pois sem ele o corte tornar-se-á impraticável, ou economicamente inviável. São exemplos clássicos: usinagem com ferramentas com baixa resistência ao cisalhamento (aço-rápido e ligas fundidas); operações onde o acabamento superficial e/ou as tolerâncias dimensionais são críticos; furação de materiais que produzem cavacos descontínuos (como o ferro fundido cinzento); corte contínuo de material metálico com ferramentas de metal duro com ou sem revestimento. As grandes desvantagens são a poluição do meio ambiente e riscos à saúde do operador. Neste sentido, fluidos de corte vegetais poderiam ser uma excelente alternativa Mota e Machado (1995).

Conforme a ANVISA (1999), os óleos vegetais são substâncias gordurosas extraída de plantas oleaginosas, em geral de sementes ou da polpa de alguns frutos, para fins alimentícios ou industriais. Chamam-se plantas oleaginosas aquelas que apresentam grandes concentrações de substâncias gordurosas nos frutos ou sementes, de onde é extraído o óleo vegetal.

Conforme Thomé el at. (2007), além das obvias vantagens de caráter ambiental, os fluidos de corte de base vegetal podem aumentar a vida das ferramentas de corte, melhorar o acabamento superficial e diminuir vibrações. Enquanto os óleos de base mineral

são formados por moléculas de hidrocarbonetos puros, os óleos de base vegetal possuem alguns grupos funcionais contento oxigênio. Isto garantirá a esses óleos uma carga levemente polar, com maior atratividade por superfícies metálicas. Estes fluidos geralmente possuem maior ponto de fulgor, 450°F contra 235°F para os óleos de base mineral, isto praticamente evita a formação de fumaça.

Como desvantagens pode-se citar a maior capacidade de oxidação – vida mais curta; menor estabilidade hidráulica devido à presença de ésteres, o que causará problemas nas emulsões. O crescimento de bactérias e fungos é maior que em óleos de base mineral. Possuem também custos mais elevados (pode chegar a 3 vezes comparado aos fluidos normalmente utilizados em usinagem). Além do custo de aquisição, o custo de manutenção é mais elevado. (THOMÉ et al., 2007).

2.5.9 Óleos comestíveis vegetais: tipos, características e propriedades

Farias et al. (2002) destacam que 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. Os óleos vegetais são constituídos principalmente de triacilgliceróis (> 95 %) e pequenas quantidades de mono e diacilgliceróis Lehninger et al. (1995).

Erhan et al. (2006) destacam que 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 deverão ser evitados, para reduzir a formação de derivados indesejáveis.

Batista et al. (1999) ressaltam que 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. Eles afirmam, que nessa fase, o óleo vegetal contém impurezas como ácidos graxos livres prejudiciais à qualidade e estabilidade do produto. Torna-se necessário então remover essas impurezas, pelos processos de refino que envolve a remoção do solvente, a degomagem, o branqueamento, a desacidificação e a desodorização. Com relação ao comportamento dos óleos vegetais, Kowalski e Dreyer (1990) afirma que, sob estresse térmico, o aquecimento intermitente, sob a ação do oxigênio atmosférico, acelerará muito o mecanismo de deterioração dos óleos e gorduras, pela ação

da hidrólise, oxidação e termo-oxidação; isto também poderá ser observado durante as fases de refino dos óleos vegetais.

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

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

Araujo (1999) destaca que a estabilidade térmica dos óleos depende de sua estrutura química: óleos com ácidos graxos saturados são mais estáveis do que os insaturados. O referido pesquisador ressalta que, como esses 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 (SCHROETER et al., 2002). A Tab.2.2 apresenta os teores de ácidos graxos nos óleos vegetais. A descrição, a classificação o teor de ácidos graxos e as características físicas – químicas dos óleos de babaçu, canola, girassol, milho e soja encontram-se no Anexo A1 a A6.

Tabela 2.2 - Aplicações potenciais de vários óleos vegetais

ÓLEOS VEGETAIS	Óleos hidráulicos, fluidos de transmissão, fluidos para conformação de metais, lubrificantes de qualidade alimentar, lubrificantes industriais, equipamentos agrícolas, graxas e biodegradáveis.
Óleo de Rícino	Graxa lubrificante de engrenagem
Óleo de Coco	Óleo para motor
Óleo de Oliva	Lubrificante automotivo
Óleo de Palma	Lubrificante de mancais de rolamentos, graxas
Óleo de Linhaça	Revestimentos, tintas e vernizes
Óleo de Soja	Lubrificantes, biodiesel, conformação de metal, tintas de impressão, óleo hidráulico, etc
Óleo de Jatobá	Graxa, cosmético industrial, lubrificantes
Óleo de Girassol	Graxas, combustível para motores diesel
Óleo de Sebo	Óleo de cilindro a vapor, lubrificantes, plásticos

Fonte: Bondiloli (2003)

2.6 Emprego dos Fluidos de Corte nos Dias mais Recentes

Em trabalho recente Lawal et al. (2012) realizaram uma revisão da literatura disponível sobre técnicas de lubrificação durante o processo de usinagem. Eles afirmaram que fatores tais como o material da peça, o material da ferramenta e as condições de usinagem foram observados como sendo essenciais para a realização de qualquer uma das técnicas.

A literatura mostrou que a técnica MQL, e o uso de lubrificante à base de óleo vegetal em todos os processos de usinagem oferece a melhor alternativa no combate aos problemas ambientais ou desafios colocados pelos lubrificantes a base de óleo mineral. Além de resolver os problemas ambientais, tem sido estabelecida por investigadores que a técnica MQL, utilizando lubrificante de óleo vegetal, exibe melhores desempenhos de usinagem. MQL também mostra redução favorável de custos, devido à redução do gerenciamento de fluido de corte. No entanto, fatores como o tipo de material da peça, processo de usinagem, material de ferramentas de corte e condições de usinagem ainda permanecem como variáveis críticas na determinação da capacidade de desempenho da técnica de MQL com lubrificante a base de óleo vegetal Braga et al. (2002).

Lawal et al. (2012) destacam que muito ainda precisa ser feito, para resolver-se a aplicação da técnica de MQL, usando lubrificante de óleo vegetal, em processos de usinagem, especialmente no processo de usinagem, para determinar a relação de usinagem, rugosidade e taxa de desgaste, pois na literatura poucos artigos estão disponíveis sobre esta técnica ao usar óleo vegetal como lubrificante. Para eles, a usinagem de materiais tais como o alumínio e aço médio carbono, que são sensíveis ao acabamento da superfície, devido à tendência do material para criar aresta postiça sobre o conjunto de ferramentas, precisam de mais investigação sob técnica MQL. Lawal (2012) e colaboradores afirmam que a geração de partículas de névoa do lubrificante e as suas características precisam ser investigadas para toda uma série de processos e condições de usinagem. Para eles, partículas de névoa geradas na técnica MQL não representam qualquer perigo para o ambiente. Um resumo do desempenho da técnica de MQL e uso de lubrificantes à base de óleo vegetal a partir da literatura disponível é aqui apresentada:

- a) A rugosidade da superfície melhorou cerca de 30% foi relatada para MQL com lubrificante à base de óleo vegetal sobre corte a seco durante processo torneamento da liga de aço AISI 9310 com ferramenta de metal duro não revestido, sob condições usinadas especificadas;
- b) Melhor lubrificação foi conseguida com éster sintético MQL em comparação com o óleo de canola MQL durante a usinagem da liga de alumínio com ferramenta de diamante policristalino;

- c) O MQLPO (mínima quantidade de líquido óleo de palma) registrou a menor força de avanço de 27 % em comparação com 19 % registrado para MQLSE (mínima quantidade de líquido de éster sintético) durante o processo de furação da liga de titânio com broca de carboneto revestido TiNAI. Geralmente, a condição MQL mostrou que a força de avanço e o torque diminuíram com o aumento da velocidade de corte;
- d) A análise da integridade da superfície da liga Ti-6Al-4V não apresentou diferença significativa entre a técnica MQL e o método convencional de aplicação de fluido de corte em abundância no processo de usinagem; e
- e) Houve redução do comprimento do desgaste de flanco da ferramenta de corte com MQL de 67,65 %, 62,66 % e 54,59 %, em comparação a usinagem a seco para taxas de avanços de 1,0 1,5 e 2,0 mm/rev, respectivamente, para 96 mm de comprimento de corte durante o fresamento de aço SKD 61 com ferramenta de metal duro não revestido.

O efeito da técnica de MQL na rugosidade da superfície e o desgaste de flanco da ferramenta na usinagem do Inconel 718 em combinações de diferentes de velocidade, utilizando-se ferramenta de cobalto, foram examinadas por Thamizhmanii et al. (2009). Os pesquisadores observaram que a vida útil da ferramenta aumentou de 43,75%, quando a técnica MQL com óleo de girassol utilizado como lubrificante foi comparado com a usinagem a seco, mas a rugosidade da superfície gerada por usinagem a seco foi superior a usinagem com MQL. No entanto, a técnica de MQL não teve uma contribuição muito significativa com velocidades de corte baixas.

Zhang et al. (2012) examinaram a vida da ferramenta e as forças de corte na usinagem de acabamento do Inconel 718 a seco e com mínima quantidade de refrigeração e lubrificação em diversas condições de corte. Verificaram que a vida da ferramenta de corte em condições de MQL é 1,57 vezes maior do que as condições de corte a seco, o que implica que o fornecimento de ar criogênico, ar comprimido e os micro gotículas de óleo vegetal biodegradável pode reduzir significativamente a taxa de desgaste e estender a vida ferramenta.

Murat et al. (2012) relataram que os fluidos de usinagem MWFs referem-se a dois tipos de produtos: óleos e fluidos aquosos que podem ser emulsões à base de água ou fluidos sintéticos. Eles são largamente utilizados em operações de usinagem ou retificação, para arrefecer e lubrificar peças e ferramentas. Reciclagem contínua destes MWFs, para cortar custos, leva à contaminação progressiva, sais de partículas e potencial desenvolvimento de microrganismos. Eles afirmam que para prevenir ou impedir a proliferação microbiana, os usuários podem adicionar biocidas para os MWFs.

Kilickap et al. (2011) constataram que os fluidos de corte são difíceis e dispendiosas de reciclar. Afirmam que estas desvantagens mencionadas poderão ser reduzidos ou eliminados através da realização das operações de corte, com lubrificação de quantidade mínima ou sem o uso de qualquer fluido de corte. Nesses estudos os efeitos de diferentes parâmetros de corte sobre as características de desempenho são investigados empiricamente durante a furação do Al7075. Nos experimentos foram empregadas brocas de HSS com um diâmetro de 8 mm, bem como a técnica de mínima quantidade de lubrificação (MQL), ar comprimido e o processamento a seco (sem o uso de qualquer tipo de líquido de refrigeração). Na técnica de furação com MQL, o líquido de arrefecimento foi pulverizado externamente na interface entre a peça e a ferramenta. Uma emulsão óleo-água com boro foi usada como fluido de corte. Foi constatado que os melhores resultados são obtidos com a técnica MQL do que com outras técnicas de aplicação de fluidos.

Ozcelik et al. (2011) realizaram estudos experimentais sobre desempenhos de fluidos de corte desenvolvido a base vegetal (girassol refinado e óleo de canola), incluindo percentuais diferentes de aditivo de extrema pressão (EP) e dois fluidos de corte comerciais (semi-sintético e fluidos de corte mineral) no processo de torneamento. O desempenho dos fluidos de corte foi investigado em relação às rugosidades superficiais, forças de corte e de avanço e desgaste de ferramentas durante torneamento longitudinal do aço AISI 304L. Os resultados experimentais foram também comparados com condições de corte a seco. Nestes estudos foi constatado que adições de 8% de aditivo de EP no fluido corte com base de canola apresentaram desempenho melhor do que os demais.

Cetin et al. (2011) estudaram o desempenhos de quatro fluidos de corte: dois fluidos de base vegetal (girassol e canola com diferentes proporções de aditivos de extrema pressão) e dois tipos comerciais (semi-sintético e mineral) analisando a rugosidade superficial e as forças de corte durante a usinagem do aço inoxidável austenítico AISI 304L. Os fluidos de corte, a velocidade de corte, a taxa de avanço e profundidade de corte são os parâmetros variados. As análises de regressão foram aplicadas para diagnosticar a rugosidade superficial e as forças de corte e de avanço. Na usinagem do AISI 304L, Cetin et al. (2011) constataram que o fluido de corte a base de girassol e canola tiveram melhor desempenho do que os demais fluidos de corte comerciais.

Brock et al. (2008) realizaram uma pesquisa experimental da viscosidade e condutividade térmica de óleos vegetais. Os resultados obtidos demonstraram que para todos os óleos vegetais investigados a condutividade térmica possui fraca dependência com a temperatura, apresentando ligeiro decréscimo com o aumento desta variável. O método gravimétrico foi empregado para a medida da densidade dos óleos vegetais estudados à temperatura ambiente, não tendo sido verificada diferença significativa entre os óleos encontrados. Para as medidas de viscosidade dos óleos vegetais foi utilizado um viscosímetro do tipo Brookfield, acoplado a um banho termostatizado com controle de

temperatura. A partir dos resultados obtidos, Brock (2008) e colaboradores constataram que a viscosidade decresce acentuadamente com o aumento da temperatura para todos os óleos vegetais. Os valores obtidos encontram-se na Tab. A11 do Anexo.

Dhar et al. (2006) investigaram o uso de MQL no torneamento de aço AISI 1040. O objetivo desse estudo foi investigar a influência dos fluídos de corte na temperatura de usinagem, na formação dos cavacos e no acabamento superficial. Foi comparado o desempenho da usinagem a seco, com fluído em forma de jorro e de MQL. Segundo os pesquisadores o uso de MQL foi melhor do que a usinagem com aplicação de fluído convencional em forma de jorro, pois a mínima lubrificação reduziu a temperatura de corte, uma vez que melhorou a interação entre os cavacos e a ferramenta, além de conservar a aresta de corte das ferramentas utilizadas. Constatado que foi possível melhorar a qualidade dimensional das peças usinadas devido à redução do desgaste e da falha das ferramentas quando aplicaram MQL. Esses autores constataram também que, devido à mínima quantidade de lubrificação ter sido mais eficiente do que nos casos de usinagem a seco, a técnica de MQL proporcionou melhorias na quebra dos cavacos, pois melhorou a interação entre cavacos e ferramenta.

Attanasio et al. (2006) pesquisaram as vantagens e desvantagens do uso de MQL, na vida das ferramentas de corte, em termos de redução do desgaste, comparado com a usinagem a seco. Na pesquisa foi utilizado aço normalizado 100Cr6, com ferramentas de metal duro revestido, com tripla camada (TiN, Al₂O₃ e TiCN). Ficou constado no trabalho de Attanasio (2006) que o desgaste de flanco foi menor para os testes que utilizaram MQL, porém diferença não foi significativa. A eficiência dessa técnica de lubrificação foi prejudicada devido a pouca penetração do lubrificante na interface cavaco/ferramenta.

Kishawy et al. (2005) investigaram o uso de MQL e de diversos outros meios de lubrificação na usinagem de ligas de alumínio-silício fundidas (A 356), utilizando *HSM High speed machining*. Eles investigaram as consequências do aumento da temperatura na usinagem, monitorando o desgaste das ferramentas de corte, as forças de corte e o acabamento das ligas fresadas. Esses pesquisadores constataram que as forças de corte diminuíram quando se utilizou MQL, comparado à usinagem a seco e que as forças ficaram muito próximas dos resultados obtidos com fluído em forma de jorro.

De acordo com Ahmed (2000) uma importante propriedade de um fluido de corte é a molhabilidade. Esta propriedade é definida como a tendência de um fluido de aderir à superfície de um sólido, em presença de outros fluidos imiscíveis. Esta tendência é medida de forma mais conveniente através do ângulo de contato (θ). Muniz et al. (2007) afirmam que 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 espalhar-se sobre a superfície e as forças coesivas do líquido que querem contrair a gota a uma esfera com uma superfície

mínima. Para esses pesquisadores, se a gota repousar sobre uma superfície homogênea perfeitamente nivelada, formar-se-á 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. Um fluido é considerado molhante (tende a molhar a superfície) quando $0^\circ < \theta < 90^\circ$ e não-molhante quando $90^\circ < \theta < 180^\circ$ Fig. 2.17.

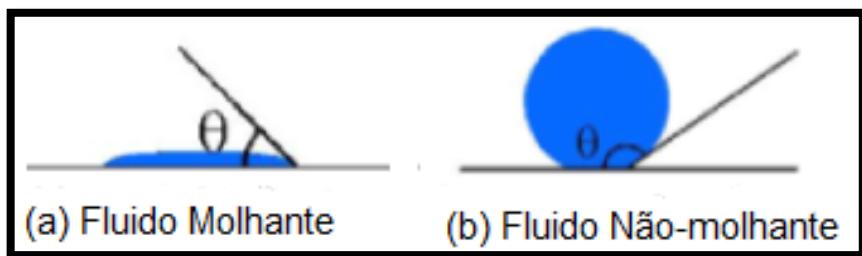


Figura 2.17 - Ângulo de contato ou ângulo de molhabilidade.

Fonte: Muniz (2007).

Ojolo et al. (2008) afirmam que vários tipos de fluidos de corte são geralmente empregados para controlar o calor gerado na usinagem. E afirma ainda que a continuação da aplicação convencional de fluidos de base petróleo no trabalho de metal está sendo desafiado pela necessidade de reduzir o volume total de fluidos, minimizar os riscos de saúde e contaminação biológica.

O uso dos bio-óleos pode ser uma tecnologia bio-compatível com o meio ambiente para o controle de temperatura. Durante a realização dos trabalhos os autores investigaram o efeito de alguns óleos vegetais na força de corte durante a usinagem do aço, do alumínio e do cobre. Os resultados encontrados por esses pesquisadores indicaram que os bio-óleos são adequados para usinagem de metais, no entanto os efeitos dos bio-óleos sobre a força de corte são dependentes do material da peça. Na análise do óleo de amendoim constataram uma maior redução na força de corte durante a usinagem do alumínio aplicando os seguintes parâmetros: a velocidade de corte de 8,25 m/min e taxas de avanços de 0,10, 0,15 e 0,20 mm/rev. Já na usinagem com o óleo de palma foram obtidos melhores resultados quando no torneamento do cobre para taxas de avanços menores que 0,15 mm / rev. No entanto, para uma maior taxa de avanço usando o óleo de amendoim foram obtidos melhores resultados para a usinagem do cobre. Em consequência de um maior cisalhamento o fluido de corte a base de óleo de coco foi o que apresentou a maior força de corte em todos os três materiais usinados e, como tal, são muitos leves na redução da força de corte durante a usinagem cilíndrica.

Silva et al. (2011) analisaram o desempenho da técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) e compararam com o método convencional de arrefecimento. O desempenho da técnica de MQL na usinagem foi avaliado com base na análise da integridade da superfície (microestrutura, rugosidade e micro dureza). Foi constatado que a

técnica MQL proporciona características muito semelhantes ao processo convencional e pode ser aplicada na indústria, contribuindo assim para uma produção favorável ao meio ambiente.

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais adotados para realização dos ensaios. Os procedimentos foram desenvolvidos e realizados no laboratório de comando numérico computadorizado localizado no DMM – Departamento de Mecânica e Materiais do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão - IFMA. A metodologia dos ensaios foi definida em função da necessidade de investigar a influência de aplicação dos óleos vegetais refinados comestíveis (girassol, canola, soja, milho e babaçu) como fluidos de corte aplicados na forma “Mínima Quantidade de Fluido – MQF”, nas forças de usinagem e torque, comparando com aplicação de fluido em abundância (jorro), usinagem a seco e óleo comercial LB2000 na forma MQF, para diferentes condições de corte.

O processo de furação com brocas helicoidais HSS novas de $\varnothing 10$ mm e ângulo de ponta de 135° , foi realizado em cheio, furo cego, sem parada da ferramenta ou retorno para quebra do cavaco, com relação comprimento do furo/diâmetro da broca de 1,5 e 5, no aço (ABNT 1045). Posteriormente foram avaliados a vida e o desgaste das ferramentas para o óleo de melhor desempenho comparando os resultados com a usinagem a seco e com o óleo vegetal comercial LB2000 a partir de um planejamento fatorial 2^3 . Foram realizados testes adicionais que envolveram a variação dos parâmetros de corte (velocidade de corte v_c , avanço f e o comprimento do furo L) com a finalidade de observar seus respectivos efeitos no processo. Foram realizados também os testes de molhabilidade, refrigeração, lubrificidade e alguns testes físicos - químicos dos óleos utilizados para fins comparativos, com objetivo de reforçar as análises dos resultados obtidos.

O fluxograma mostrado na Fig.3.1 define os procedimentos adotados neste trabalho.

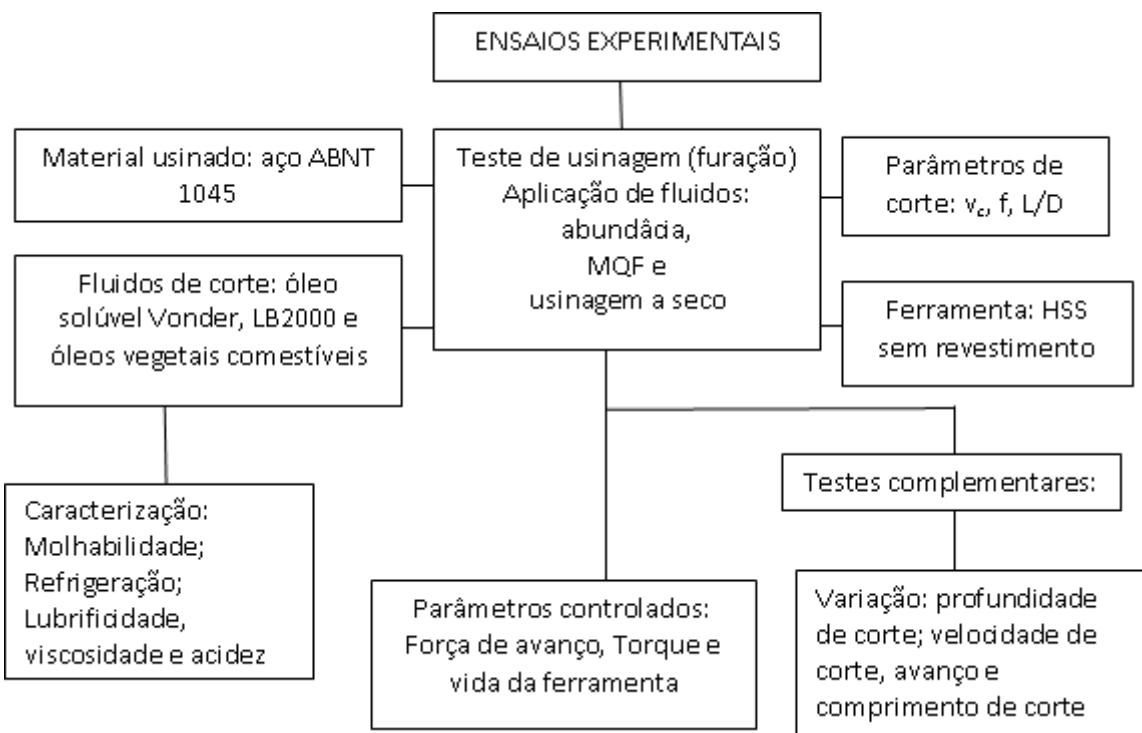


Figura 3.1 - Fluxograma dos procedimentos para os testes experimentais
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

3.2 Procedimentos Experimentais Realizados em Laboratório

3.2.1 Testes de molhabilidade

Os testes de molhabilidade foram realizados na Pontifícia Universidade Católica do Paraná PUC – PR. O equipamento utilizado foi KRUSSEASYDROP (LACEM – PUCPR), volume de gota: 10 μ L, velocidade de medição do ângulo de contato: 2 medidas por segundo. Tempo de medição: 60s. 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 3 vezes para cada óleo utilizado (4 x para o óleo LB 2000).

3.2.2 Testes de refrigeração

Os testes de refrigeração dos fluidos utilizados como fluido de corte foram efetuados no laboratório de máquinas ferramentas do Departamento de Mecânica e Materiais – IFMA (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão). Os equipamentos utilizados foram: um torno mecânico de marca NARDINI Tipo ND325a, um forno elétrico de marca QUIMIS com capacidade de aquecer até 1200°C, uma placa de

aquisição de sinais PICO TECNOLÓGY, modelo USB TC-08, com intervalo de saída de -76 mV a +76 mV com 8 (oito) entradas para termopares tipo: K, J, B, S, T etc., um aparelho mínima quantidade de fluido (MQF) e um software MIPro Standard v1.1 (EN) instalado no notebook tal como mostrada na Fig.3.2. O teste de refrigeração consiste em aquecer o corpo de prova a 400 °C por uma hora no forno elétrico. Após atingir o tempo de homonegização, as peças foram retiradas do forno com equipamentos de segurança apropriados (luva de raspa e garras) e fixadas na placa de castanhas do torno; em seguida, encostou-se rapidamente o termopar que está fixado no suporte da porta-ferramenta do carro móvel sentido longitudinal no final do furo interno da peça. Esperou-se a temperatura atingir 320°C monitorada pela placa de aquisição, ativou-se primeiramente o software de aquisição da temperatura, em seguida ligou-se simultaneamente o torno a uma rotação de 180 rpm e o aparelho pulverizador MQF com o fluido investigado a uma vazão de 50 ml/h. Os resultados foram registrados em forma de gráfico até atingir 30°C. Após a realização dos ensaios importou-se os pontos do arquivo txt de cada ensaio para o programa Origin e gerou-se o gráfico com todas as curvas de resfriamento e com ferramenta Screen Reader (leitor de tela) do origin encontrou-se em cada curva a temperatura e o tempo correspondente nos intervalos (300, 200 e 30 °c) e com esses dados calculamos a taxa de resfriamento para análise. Este teste foi baseado em teste similar proposto por Sales (1999).

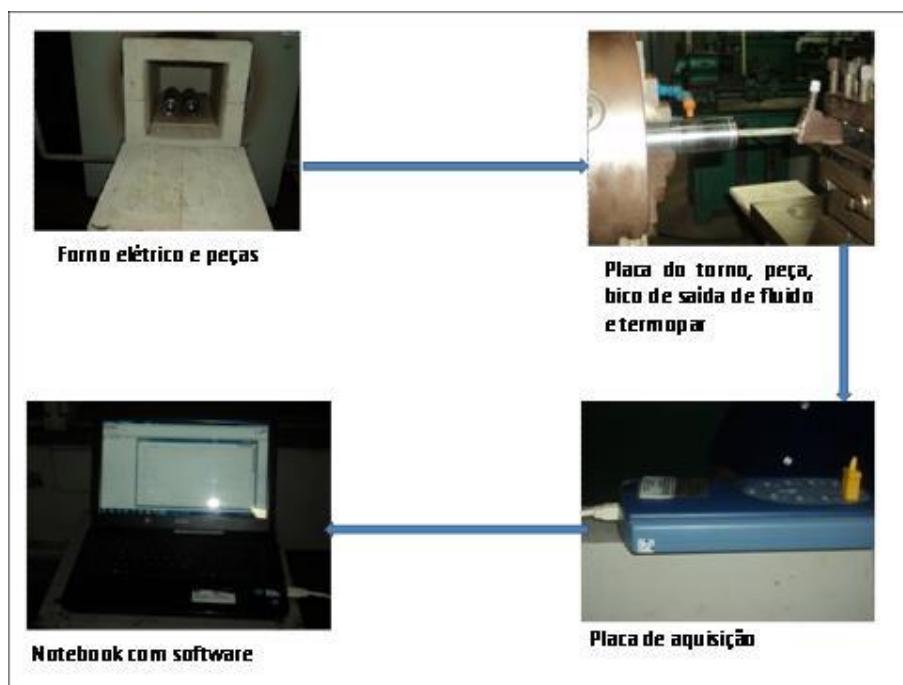


Figura 3.2 - Esquema para aquisição de dados no ensaio de refrigeração.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

3.2.3 Testes de lubrificidade

Os ensaios de lubrificidade ou capacidade de lubrificação foram realizados em um esclerômetro pendular, tal como mostrado na Fig.3.3 (a) pertencente ao laboratório de tribologia de materiais da UFU. O ensaio consiste em produzir um risco no corpo de prova retangular Sales (1999) cujas dimensões foram $11 \times 11 \times 49 \text{ mm}^3$. Após os corpos de prova serem fixados e ajustados na base da máquina os mesmos eram circulados com fitas adesivas de tal maneira que óleo investigado permanecesse retido formando uma camada de 3 mm de espessura para realização dos ensaios, Fig. 3.3 (b). Antes e depois da realização dos ensaios, as peças eram pesadas numa balança de precisão da marca: MARTE AS1000 de fabricação ART LAB com sensibilidade de 0,01g, Fig. 3.3 (c) para medição da massa de material removido pelo risco gerado pela extremidade do pêndulo. Durante a realização dos ensaios o pêndulo com penetrador piramidal de base quadrada na extremidade era liberado sob uma determinada altura fornecida pelo sistema do equipamento de forma que realizasse o riscamento da peça. A profundidade do risco gerado foi medida por meio de relógio comparador para análise posterior, que é feita, calculando-se a energia específica de riscamento “e”, que é definida como a relação da energia dissipada para produzir o risco “E” e a perda de massa produzida, Δm , Eq. 3.11.

$$e = \frac{E}{\Delta m} \left(\frac{J}{mg} \right) \quad 3.11$$

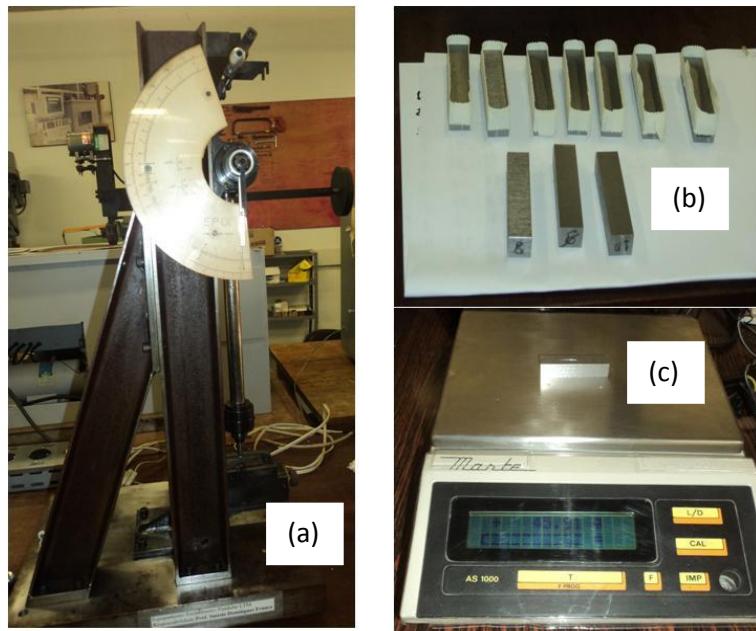


Figura 3.3 - (a) máquina de pendulo, (b) amostras de aço, (c) balança de precisão.
 Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

3.2.4 Análise físico-química dos óleos vegetais

a) Ensaios de viscosidade

A viscosidade dos óleos utilizados foi obtida através do viscosímetro rotacional brookfield, modelo DV-III ULTRA, acoplado a um reservatório de pequenos volumes (16 ml), modelo Small Sample SC4-31, com spindle de medida capaz de medir viscosidades na faixa de 1 a 299936 mPa.s do laboratório de caracterização cerâmica do DMM/IFMA (Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão. Para as medidas com a temperatura, foi acoplado ao reservatório de pequenos volumes um banho termostatizado, da Brookfield, modelo TC-502P, capaz de estabilizar a temperatura entre -20 a $200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. As medidas foram registradas no notebook utilizando-se um software de aquisição e análises de dados da Brookfield, modelo RHEOCALC, em temperaturas de 20 a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, com intervalo de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, após 1 minuto de a temperatura ser estabilizada e após 1 minuto de aplicada a rotação de 200 rpm para efetuar as medidas. A Fig. 3.4 mostra o esquema para aquisição da viscosidade.



Figura 3.4 - Esquema de aquisição da viscosidade dos óleos.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

b) Ensaio de acidez

O ensaio de acidez dos óleos vegetais ensaiados foi realizado após o encerramento dos experimentos que durou em torno de 2 anos, no laboratório de análise de água do IFMA campus Maracanã através dos métodos Titulométrico com agitador (em solução de NaOH 0,1N padronizada). Para esse ensaio foram utilizados dois parâmetros para obtenção da acidez (Mg KOH/g) e (ácido oleico %p/p).

3.3 Material da peça utilizada

3.3.1 Caracterização do material usinado

O material utilizado foi o aço ABNT 1045 cujas características são boa usinabilidade, boa resistência mecânica, média soldabilidade e alta forjabilidade. As suas características química fornecida pelo fabricante são mostradas na Tab. 3.1 e está de acordo com certificado da Tab. A7 do Anexo e de acordo com a composição química de aços especificados pela norma DIN 17.200, Ferraresi (1977). Tab. A8 do Anexo.

Tabela 3.1 – Composição química (% em massa) do material utilizado nos ensaios fornecido pelo Fabricante.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	N	V
0,48	0,26	0,66	0,023	0,017	0,16	0,05	0,02	0,013	0,1	0,0079	0,002

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Para observação da microestrutura e medição da dureza, amostras do material de duas seções foram embutidas a frio em resina de acrílico. Após a cura as amostras foram lixadas com lixas com granulometria de nº 200, 300, 400, 500, 600 e 1000 mesh, seguindo essa ordem. Em seguida, foram polidas, utilizando-se pasta de diamante de granulometria de 1 μ m. Para revelação da microestrutura as amostras foram atacadas quimicamente com nital a 2%, para posterior observação utilizando o microscópio óptico Olympus, no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), bloco 1R, FEMEC / UFU. A Fig. 3.5 (a) mostra a identificação das seções escolhidas para análise e Fig.3.5 (b) mostra as amostras embutidas em baquelite prontas para serem lixadas e polidas, as Fig. 3.6 mostra a micrografia da seção 1 (a) 50 μ m (b) 10 μ m e Fig. 3.7 mostra as micografia da seção 2 (a) 50 μ m (b) 10 μ m de sua microestrutura característica, onde se pode observar a matriz ferrítica, a parte clara, e os grãos de perlita, a parte escura, caracterísca dos aços médio carbono e que está de acordo com Fig. A1 do Anexo. (METALS HANDBOOK (1972).

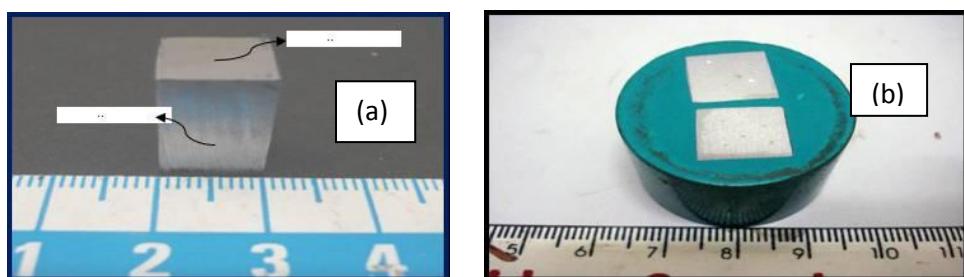


Figura 3.5 - (a) Detalhe e identificação das seções escolhidas para análise; Seção 1 - perpendicular (ou transversal) e Seção 2 - paralela (ou longitudinal) à direção de laminação da barra. (b) Amostras embutidas em baquelite prontas para serem lixadas e polidas.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

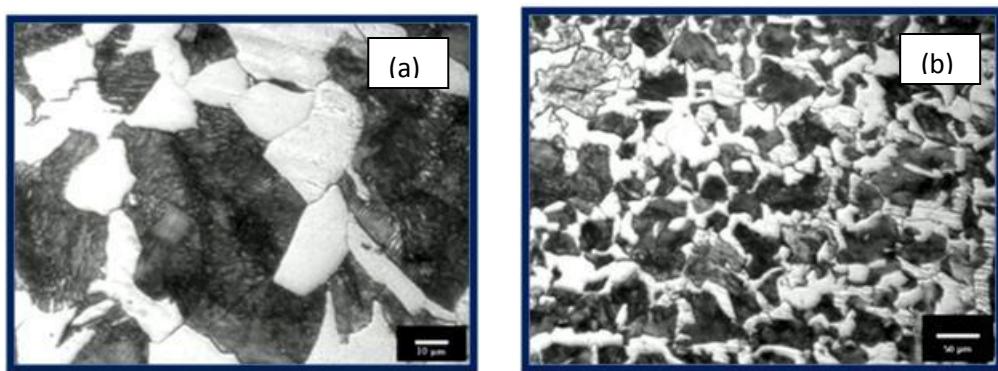


Figura 3.6 - Microestrutura da seção 1 transversal. Ataque Nital à 2%, (a) 50 µm (b) 10 µm
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

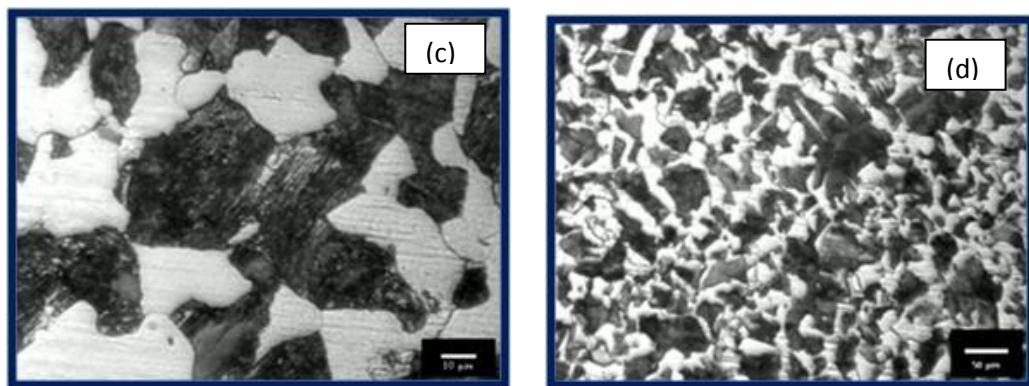


Figura 3.7 - Microestrutura da seção 2 longitudinal. Ataque Nital à 2%, (a) 50 µm (b) 10 µm.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Realizaram-se ensaios de dureza Vickers com carga de 40 kg e cinco identações para cada amostra, onde posteriormente foi obtida a média e o desvio padrão. A Tab 3.2 mostra as medidas obtidas cujos valores convertidos de HV para HB estão dentro do intervalo permitido pela norma AISI 179 - 229 HB Tab A9 do Anexo Ferraresi (1977). O equipamento utilizado foi o microdurômetro modelo HM – 102, fabricado pela Mitutoyo.

Tabela 3.2 - Ensaio de dureza Vickers 40 kg do material usinado.

Caracterização de Material (Aço ABNT 1045) Ensaios de Dureza (HV 40 kg)		
Ensaios	Seção 1	Seção 2
1	181	176
2	181	176
3	181	176
4	176	176
5	179	181
Média	179,6	177
Desvio padrão	2,2	2,2

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Os corpos de prova foram inicialmente cortados em uma serra de fita nas dimensões brutas de $\varnothing 104 \times 54$ mm e posteriormente torneadas para dimensões finais conforme a Fig. 3.8. Também foram preparados os sistemas e dispositivos de fixação peça/máquina. Para otimizar o número de furos e melhor aproveitamento do corpo de prova, foi gerado um programa CNC que permitia a obtenção de 42 furos por face, alternados em circunferências de 6, 15, 30 e 42 mm e espaçamento entre os furos foram de 2,56 mm; 2,56 mm e 5,70 mm, respectivamente Fig 3.9.

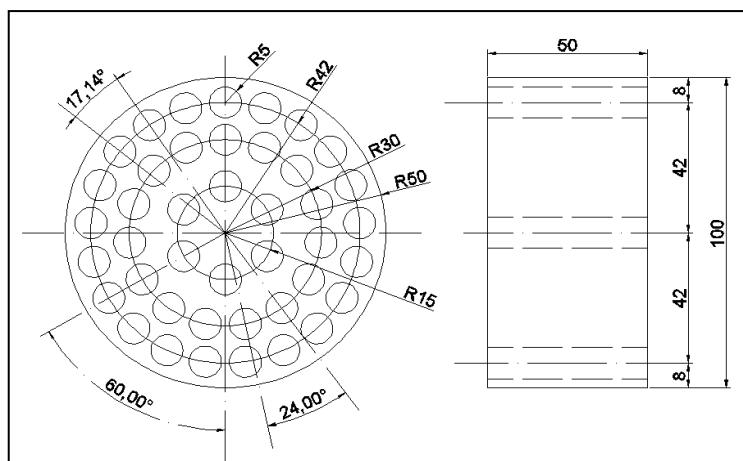


Figura 3.8 - Dimensões dos corpos de prova.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

3.4 Ferramentas e equipamentos utilizados

3.4.1 Ferramenta utilizada

Para o desenvolvimento desse trabalho as ferramentas de corte usadas nos ensaios experimentais foram brocas helicoidais em aço rápido de alto rendimento sem revestimento segundo a norma DIN 338 de corte para direita tipo H, com dois gumes de corte e ângulo de ponta de 135° em cruz de autocentragem. A Fig. 3.9 mostra a broca utilizada.



Figura 3.9 Broca para metal HSS-G de 10 mm de diâmetro sem revestimento, DIN 338, C1 = 87 mm, C2 = 133 mm e D = 10 mm.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

3.4.2 Máquina ferramenta

Os ensaios foram realizados no centro de usinagem vertical DISCOVERY 560 ROMI Fig. 3.10, disponível no Laboratório de Maquinas Ferramentas (Laboratório CNC) do DMM/IFMA. Possui troca automática de ferramenta, com capacidade para 22 ferramentas, O eixo árvore é acionado por um motor CA de 12.5 CV e potência total instalada de 15 KVA, com variação contínua de rotação de 7 a 7500 RPM. Um dos programas para realização dos furos deste trabalho encontra-se no Apêndice 2.



Figura 3.10 - Centro de usinagem vertical, Discovery 560, ROMI.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

3.4.3 Sistemas de aplicação dos fluidos

A forma de aplicação do MQF nos ensaios ocorreu utilizando-se o aparelho pulverizador de fluido, modelo O2AO-STD fabricado pela ITW *Fluir Products Group*, operava com um fluxo contínuo de ar comprimido, ajustado em torno de 4 bar, e “spray” intermitente de fluido na frequência de 1 pulso por segundo. Esse sistema consiste de um reservatório para o fluido de corte com alimentação manual, válvulas para regulagem do fluxo de ar comprimido e 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. O fluido de corte é conduzido através de uma mangueira de menor diâmetro que chega ao bico, dentro de uma de outra maior que conduz o ar comprimido registrando uma vazão de 50 ml/h. A Fig. 3.11 ilustra o aparelho pulverizador.

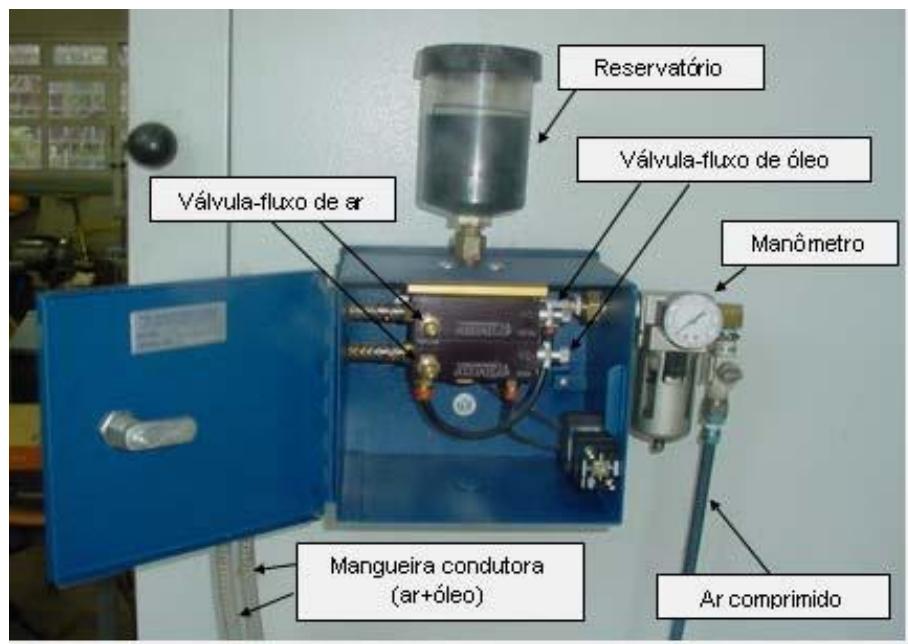


Figura 3.11 - Aparelho pulverizador para aplicação do MQF
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

3.5 Fluidos Utilizados e Características Típicas

a) Óleos vegetais comestíveis

Foram utilizados os óleos vegetais comestíveis refinados de babaçu, canola, girassol, milho e soja e todos com características típicas, biodegradáveis, atóxico e insolúvel em água. As Tabs A1 A5 do Anexo mostram as características físicas e químicas obtidas desses óleos.

b) Óleo vegetal accu-lube/lb2000

Óleo biodegradável, atóxico e insolúvel em água, com composição química de óleos vegetais (soja, milho e canola) e aditivos anticorrosivos. As características físicas e químicas encontram-se listados abaixo.

Aparência: Óleo viscoso azul escuro

Densidade específica: 0.92 g/ml

Viscosidade: 35 a 39 cSt (40°C)

Conteúdo de Enxofre Ativo: 0,0%

Total de Cloro: 0,0%

Silicones: 0,0%

Nível de COV (Carbono Orgânico Volátil): 0,0%

Ponto de Fulgor: 320°C (608°F)

Ponto de Fluidez: - 20°C (-4°F)

Óleo Mineral: 0.0%

Solubilidade em água: Insolúvel

c) Óleo solúvel VONDER utilizado no sistema em abundância

Fluido biodegradável, elaborado a partir de aditivos de extrema pressão, boa oleosidade, boa absorção de calor, antiferruginose, antiespumante, antibactericida, untuoso, viscoso e transparente em solução aquosa para usinagem em tornos, furadeiras, serras, fresas e outras máquinas e ferramentas.

O sistema utilizado para aplicação do fluido por jorro foi o sistema do próprio Centro de Usinagem CNC, que proporciona uma vazão em torno de 540 L/h distribuída por dois bicos numa razão de concentração de 5% recomendado pelo fabricante.

3.6 Parâmetros de monitoramento da vida e desgaste da ferramenta

Os parâmetros de monitoramento obtidos durante os ensaios experimentais deste ensaio, para a medição do grau de desgaste da ferramenta foi por meio de fotos digitais obtidas através do Microscópio Triocular QUIMIS Q -735 STZ e analisador de imagens do Departamento de Química (DQ) do IFMA - Monte Castelo. Onde o sistema de captura e análise de imagens para a medição do desgaste na ferramenta é apresentado na Fig 3.12.



Figura 3.12 - Microscópio triocular para monitoramento do desgaste.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

3.7 Medição de forças e torque

Para medição das forças de avanço e torque, foi utilizado um dinamômetro Kistler tipo 9271A e um amplificador de carga para sensores piezoeletricos tipo 5006. Os

sinais provenientes do amplificador, foram convertidos por uma placa aquisição de sinais USB multifunções, tipo módulo 1208FS, processados e armazenados em um microcomputador (notebook) e um software desenvolvido em linguagem DELPHI, versão 7 da Borland que capta esses sinais e os exibe em forma de gráficos.

A Fig. 3.13 mostra a disposição da máquina e equipamentos utilizados nos ensaios experimentais para aquisição de força e torque e a Fig. 3.14 mostra o detalhe da disposição da broca e bicos para aplicação da mínima quantidade de fluido MQF e a peça montada com dinamômetro no dispositivo fixado na base da máquina.

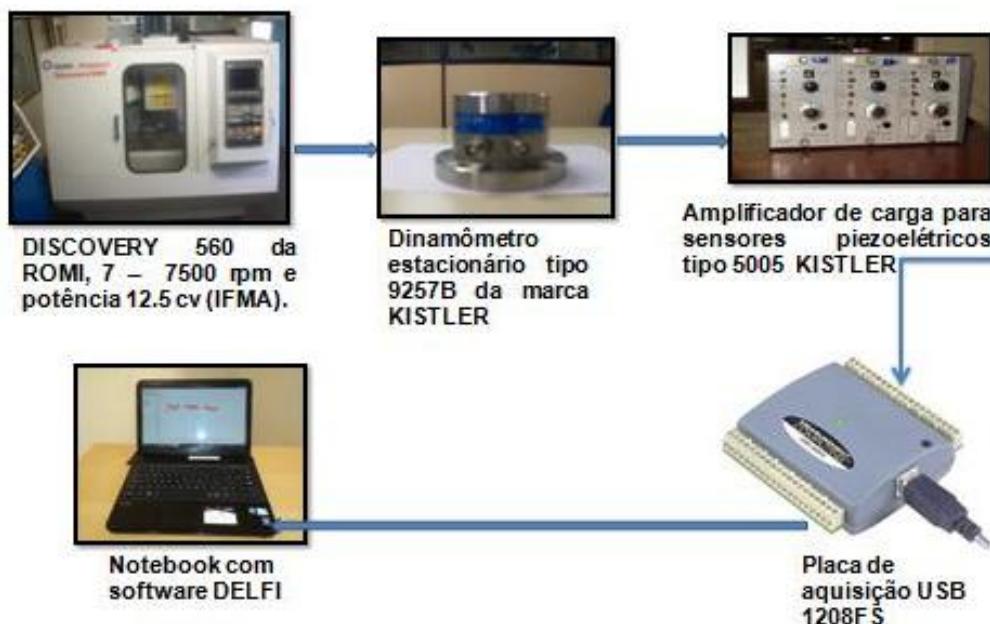


Figura 3.13 - Dispositivo do sistema para aquisição de força e torque
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

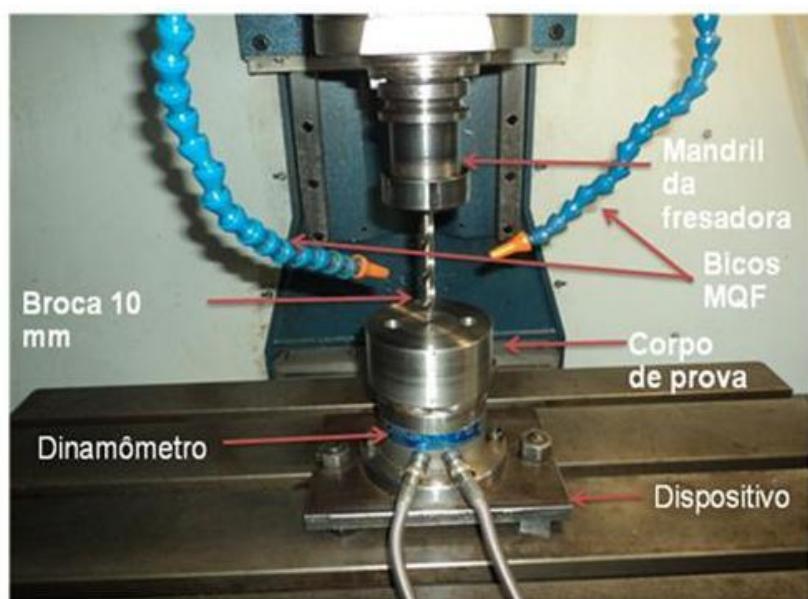


Figura 3.14 - Detalhe do sistema para aquisição de força e torque.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

3.8 Planejamentos dos experimentos

Para a realização dos experimentos foram definidos 3 parâmetros de corte quantitativos e um qualitativo como variáveis de entrada: velocidade de corte nível inferior de 17 m/min e nível superior de 25 m/min, avanço nível inferior de 0,1 mm/rot e nível superior de 0,2 mm/rot e comprimento do furo de 15 mm e 50 mm e fluidos de corte conforme Tab. 1 de planejamento fatorial do Apêndice. Os parâmetros foram escolhidos a partir do catálogo do fabricante de brocas HSS norma DIN 338 para aplicação geral LENOX – TWILL Tab. 10 do Anexo.

A força de avanço e torque foram as variáveis de saída e estabelecida às variações para cada teste num planejamento fatorial de 2^4 a dois níveis, conforme Tab. A1 Apêndice que representa uma pequena parte dos testes realizados.

Assim foram planejadas 8 condições de corte diferentes para cada ensaio, comparando-se sempre dois a dois, ou seja: para cada combinação de óleo resultará em uma matriz de planejamento semelhante a matriz com 16 testes e a comparação acontecerá sempre de um óleo comestível e um processo de furação ou forma de aplicação de fluido já existente, sendo (5 óleos vegetais, um óleo comercial LB200, fluido em abundância (jorro) utilizando-se o óleo emulsionável VONDER e a seco). Considerando-se um teste, uma réplica e uma tréplica para os quatro primeiros testes, foi possível realizar 96 testes ($8 \times 4 \times 3$) e apenas teste e réplica para os 4 últimos testes serão 64 testes ($8 \times 4 \times 2$), totalizando 160 testes para essa etapa. As réplicas e treplicas serão realizadas para análise estatística. A Tab. 3.3 mostra a definição dos valores a dois níveis e combinações para os a realização dos testes.

Tabela 3.3 – Variáveis de entrada a dois níveis

FATORES	NÍVEL	
	-1	+1
V_c (m/min)	17	25
f (mm/v)	0,1	0,2
L (mm)	15	50
Combinação (1)	Girassol	A seco
Combinação (2)	Girassol	LB2000
Combinação (3)	Girassol	Jorro
Combinação (4)	Canola	A seco
Combinação (5)	Canola	LB2000
Combinação (6)	Canola	Jorro
Combinação (7)	Soja	A seco
Combinação (8)	Soja	LB2000

Combinação (9)	Soja	Jorro
Combinação (10)	Babaçu	A seco
Combinação (11)	Babaçu	LB2000
Combinação (12)	Babaçu	Jorro
Combinação (13)	Milho	A seco
Combinação (14)	Milho	Lb2000
Combinação (15)	Milho	Jorro

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Para realização do teste de vida a metodologia aplicada foi baseada em um planejamento fatorial a dois níveis 2^3 , sendo os efeitos e níveis de significância das variáveis determinados pelo programa Statistica 7.0. Com o emprego desse planejamento foi possível analisar os efeitos e a vida da ferramenta através de uma matriz de planejamento com 8 ensaios. A Tabela 3.4.indica as variáveis empregadas para o planejamento.

Tabela 3.4 - Matriz de planejamento fatorial

Nº de Ensaio	v_c (m/min)	f (mm/rot)	Sistema de Refrigeração
1	17	0,10	Seco/LB2000
2	25	0,10	MQF
3	17	0,20	MQF
4	25	0,20	Seco/LB2000
5	17	0,10	MQF
6	25	0,10	Seco/LB2000
7	17	0,20	Seco/LB2000
8	25	0,20	MQF

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Na Tabela 3.5 a seguir está demonstrada a forma de aplicação, vazão do fluido e em quais os ensaios que foram aplicados.

Tabela 3.5 - Formas de aplicação, vazão do fluido e ensaios realizados.

Tipo de Fluido	Formas de Aplicação	Vazão	Ensaios Presente
Vegetal (Óleo Girassol)	MQF	50 ml/h	2, 3, 5,8
Seco (Sem fluido)	-	-	1, 4, 6, 7
LB2000	MQF	50 ml/h	1, 4, 6, 7

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Considerações iniciais

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios realizados no processo de furação do aço ABNT 1045, com o objetivo de investigar a influência dos óleos vegetais como fluido de corte, quais óleos tiveram melhor comportamento no processo, comparar com aplicações já existentes e também analisar a influência dos parâmetros de corte. Os parâmetros de saída, força de avanço (F_z) e torque (M_z) foram obtidos para as condições conforme planejamento fatorial já apresentado. O sistema de monitoramento da força de avanço e torque registrou corretamente os sinais dos esforços envolvidos durante o processo, ficando similar à Fig. 2 do Anexo, apresentada no manual Kistler (2000) (*measure analyse innovate*). Inicialmente são apresentados e discutidos os ensaios experimentais que não envolveram usinagem (verificação da capacidade lubrificante dos fluidos de corte) para que possamos relacioná-los em seguida com os ensaios que envolveram usinagem (força, torque e vida da ferramenta).

4.1.1 Resultados dos testes de molhabilidade.

A Fig. 4.1 mostra a variação dinâmica do ângulo de contato da gota de cada um dos fluidos de corte utilizado neste trabalho durante 60 segundos gerados pelo programa originPro 8.0. Este gráfico expressa o ângulo de contato da gota no tempo de 60 segundos de ensaio sendo calculado o valor médio das 3 medições de cada ponto com o respectivo desvio padrão.

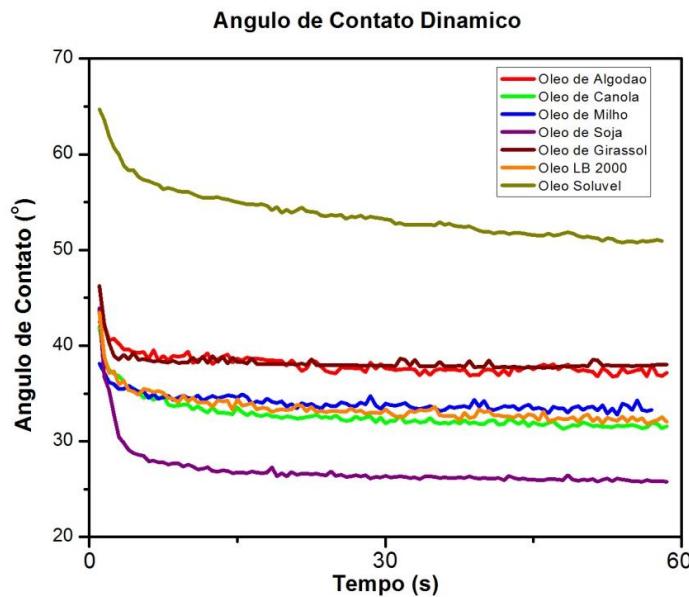


Figura 4.1. Gráfico da variação do ângulo de contato no decorrer do tempo dos óleos vegetais, LB2000 e óleo solúvel.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Observa-se que todos os óleos ensaiados possuem ângulo de contato θ entre 0 e 90. Um fluido é considerado molhante quando este ângulo é menor que 90° Ahmed (2000). Dentro do intervalo considerado molhante, quanto menor o ângulo de contacto maior a molhabilidade, isto é, mais o líquido molhará a superfície sólida em contacto. Ângulo de contato decrescente molhabilidade crescente e nesta definição temos a seguinte classificação em termos de molhabilidade: óleo solúvel, girassol, algodão, milho, LB2000, canola, e soja. A Fig. 4.2, mostra Ângulo de contato 60 segundos após o contato inicial da gota na superfície da peça que confirmam esta sequência.

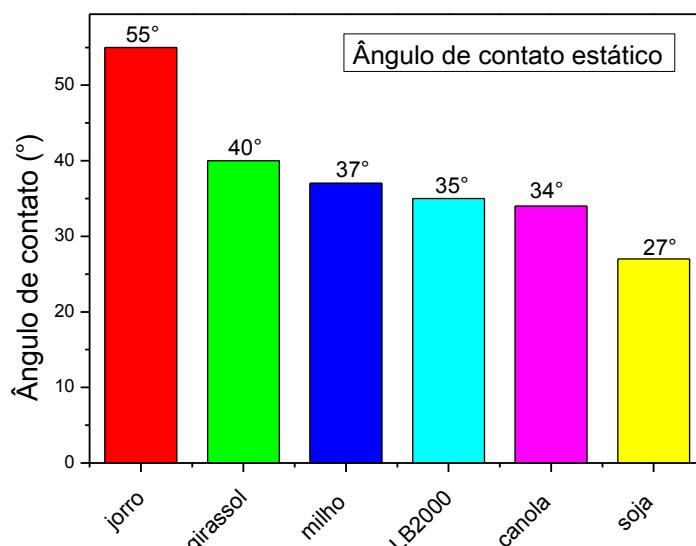


Figura 4.2 - Ângulo de contato 60 segundos após o contato inicial da gota na superfície.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Por meio deste gráfico, podemos observar que a variação do ângulo de contato θ em um mesmo tempo de 60 segundos foi diferente, com menor média para o óleo de soja e maior para o óleo solúvel. Todos os fluidos de corte utilizados neste trabalho, de um modo geral, apresentam características de boa molhabilidade, sendo o fluido sintético um pouco superior e o óleo de soja um pouco inferior.

4.1.2 Resultados dos ensaios de refrigeração

A Figura 4.3, aponta o gráfico correspondente aos ensaios de temperatura em função do tempo para os óleos comestíveis (babaçu, girassol, soja, canola, milho e algodão), óleo comercial LB2000 e aplicação a seco.

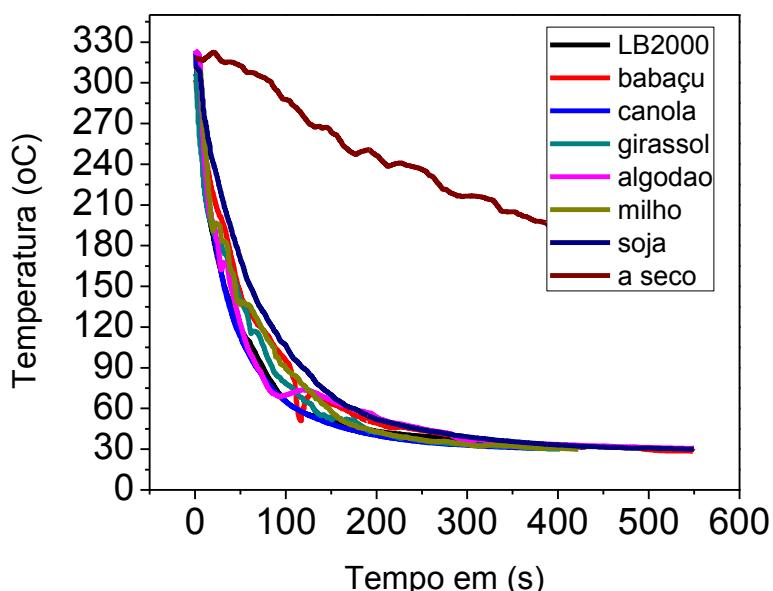


Figura 4.3 - Gráfico da temperatura em função do tempo dos óleos vegetais e a seco.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

As curvas dos óleos comestíveis e do óleo comercial LB2000, tiveram em geral um mesmo comportamento. A aplicação a seco se destacou dos demais, indicando uma refrigeração muito lenta da temperatura em relação aos demais, o que já era esperado pela falta de fluido. Para uma análise mais minuciosa, as Tabs. 35 e 36 do Apêndice mostram a taxa de refrigeração no intervalo de temperatura de [300 a 200]°C e [300 a 30]°C para cada óleo e a seco. Sabe-se que, quanto maior o tempo menor a taxa, no primeiro intervalo calculado, teremos numa ordem decrescente: milho, LB2000, babaçu, girassol, canola e a seco, e num intervalo de tempo maior também na ordem decrescente: canola, girassol, babaçu, milho, LB2000, algodão e soja, o que nos permite dizer que, os óleos comestíveis apresentam um excelente poder de refrigeração, quando comparados com aplicações já existentes, no caso LB2000 e a seco.

4.1.3 Resultados dos ensaios de lubrificidade ou ensaios de energia específica

A Fig. 4.4 mostra o comportamento da energia específica média consumida nos riscos das amostras de aço ABNT 1045, para uma mesma perda de massa equivalente a 20 mg imersas em 3 mm de profundidade nos fluidos de corte a base de óleos vegetais e no fluido em abundância (jorro), conforme Tab. 37 do Apêndice.

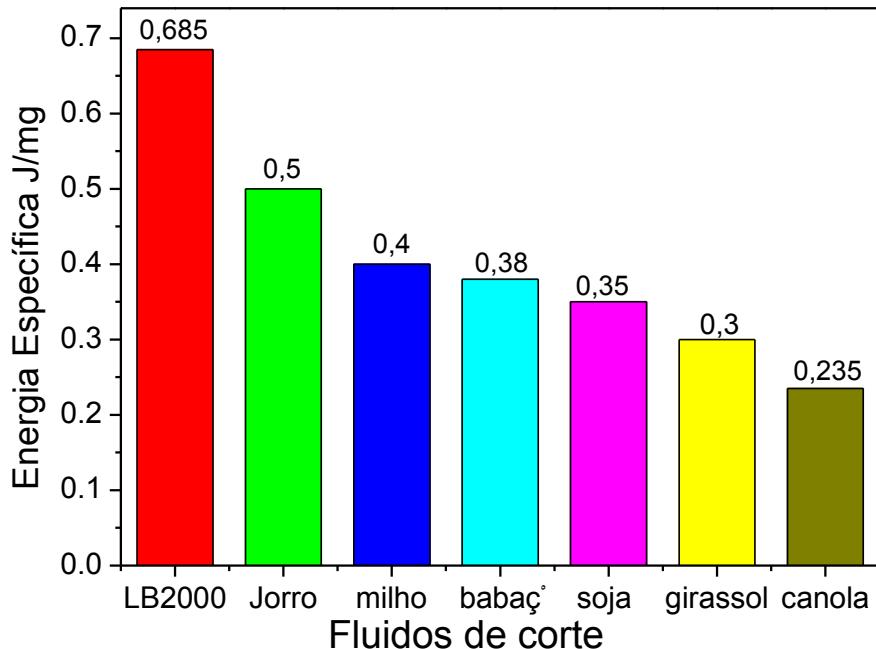


Figura 4.4 - gráfico da energia específica média consumida em amostras aço ABNT 1045 submersas em fluidos de corte.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

De acordo com a Fig. 4.4, o fluido de corte de base vegetal com maior capacidade de retirada de calor, isto é, fluido refrigerante, nesta análise, foi o que apresentou maior energia específica. Em ordem decrescente de energia específica os resultados são: LB 2000, óleo sintético, milho, babaçu, soja, girassol e canola. Os que possuíram uma maior capacidade de lubrificação apresentaram uma menor energia neste caso o óleo comestível de canola e girassol, e que, de acordo com a literatura Teixeira Filho et al. (2001) promove a redução do coeficiente de atrito cavaco ferramenta e ferramenta-peça, reduzindo força total, potência de corte e temperatura. 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.

O fluido solúvel 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, acima da maioria dos fluidos aplicados.

4.1.4 Resultados dos ensaios físico – químicos

a) Ensaio de viscosidade

A Tabela 4.1 mostra os valores das viscosidades obtidas nas temperaturas 20, 40, 60 80 e 100 °C e a Fig. 4.5 aponta o comportamento dos óleos utilizados. Os gráficos gerados durante o ensaio encontram-se nas Figs. 11 a 17 do Apêndice.

Tabela 4.1 - viscosidade dos fluidos utilizados.

T(°C)	LB2000	Canola	Milho	Girassol	soja	Babaçú	Jorro
20	90,88	74,23	70,48	69,43	59,83	59,68	3,14
40	42,14	36,14	34,79	34,04	30,59	28,79	2,69
60	21,59	19,34	18,44	18,29	16,79	14,99	2,24
80	12,89	12,14	11,39	11,54	10,64	8,99	2,24
100	8,548	8,248	7,798	7,798	7,49	5,99	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Estes gráficos mostram que à medida que a temperatura aumenta a viscosidade diminui acentuadamente para todos os óleos vegetais, com tendência a ficarem com baixa viscosidade e de valores aproximados, permitindo concluir que a partir de 60 °C os óleos vegetais possuem a mesma viscosidade e provavelmente devem apresentar efeitos semelhantes. Esses resultados estão de acordo com Brock et al. (2008), Tab. 11 do Anexo, Silva et al. (2011), Tab. 12 do Anexo e a norma ABNT NBR 15422 (2006), viscosidade cinemática Tab. 13 do Anexo.

Diniz et al. (2003) reportam que a viscosidade deverá ser suficientemente baixa para permitir uma boa circulação do fluido (maior facilidade para fluir); capacidade de envolver (“molhar”) bem toda a peça na região de corte (estabelecer um bom contato térmico - refrigeração) e suficientemente alta de modo a permitir uma boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta (lubrificação). Pode-se concluir que os óleos testados utilizados como, Mínima Quantidade de Fluido (MQF), são apropriados como fluidos de corte no processo de furação, lembrando-se que esta forma de aplicação mistura ar e óleo possui boa capacidade de lubrificação da região de corte, entretanto, não apresenta boa capacidade de refrigeração.

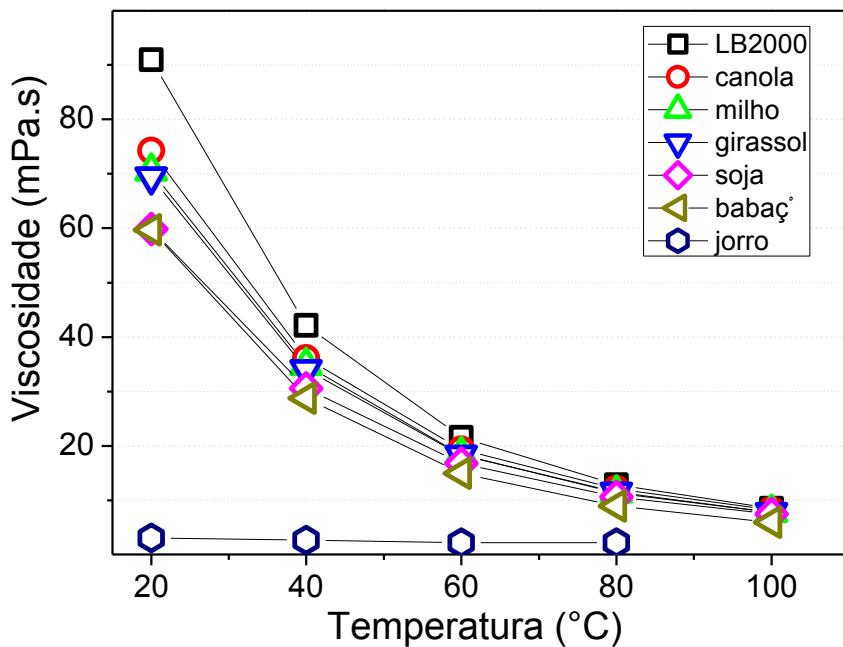


Figura 4.5 - Resultados da viscosidade dos óleos comestíveis vegetais, do fluido comercial LB2000 e o fluido sintético utilizados na pesquisa.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

b) Ensaio de acidez dos fluidos utilizados.

A Tab. 4.2 mostra o resultado das análises de índice de acidez dos óleos utilizados após a realização dos experimentos. Os mesmos realizados no laboratório de águas e bebidas do IFMA (São Luís – Campus Maracanã), e o laudo dessas análises encontram-se na Tab. 14 do Anexo.

Tabela 4.2 - Resultados dos índices de acidez dos fluidos utilizados.

Parâmetro	Óleo de canola	Óleo de milho	Óleo de girassol	Óleo de babaçu	Óleo de algodão	Óleo de soja	Óleo de LB2000	Fluido sintético
Índice de Acidez (mgKOH/g)	0,811	1,083	0,814	0,552	0,824	0,568	2,458	1,372
Índice de Acidez (Ácido oleico % p/p)	0,408	0,544	0,409	0,277	0,414	0,285	-	-

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Os resultados expressam que os índices de acidez obtidos após a realização dos ensaios que durou 02 anos, estão acima do máximo permitido para consumo humano ou até mesmo para fins carburantes Bondiloli (2003), conforme Tabelas. A1, A2, A3, A4 e A5 do Anexo. Também no emprego carburante do óleo, elevada acidez livre tem ação

corrosiva sobre os componentes metálicos. Conclui-se que, mesmo aplicados na forma MQF provavelmente provocam oxidação, precisar-se-á de cuidados especiais em seu manuseio durante e após os ensaios.

Após análises dos óleos comestíveis (babaçu, canola, girassol, milho e soja) e os demais fluidos sem qualquer modificação em suas características físico-químicas utilizados nesta pesquisa, podemos observar que todos apresentaram uma boa molhabilidade, boa refrigeração e boa lubrificação, destacando-se os óleos de médias e baixas viscosidade.

4.2 Análises da força de avanço

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram os gráficos de barra correspondente às médias e desvios padrão das forças de avanços (a) dos testes 1 a 4 e (b) dos testes 5 a 8, para cada fluido e a seco conforme a Tab. 2 e Tab. 3 do apêndice.

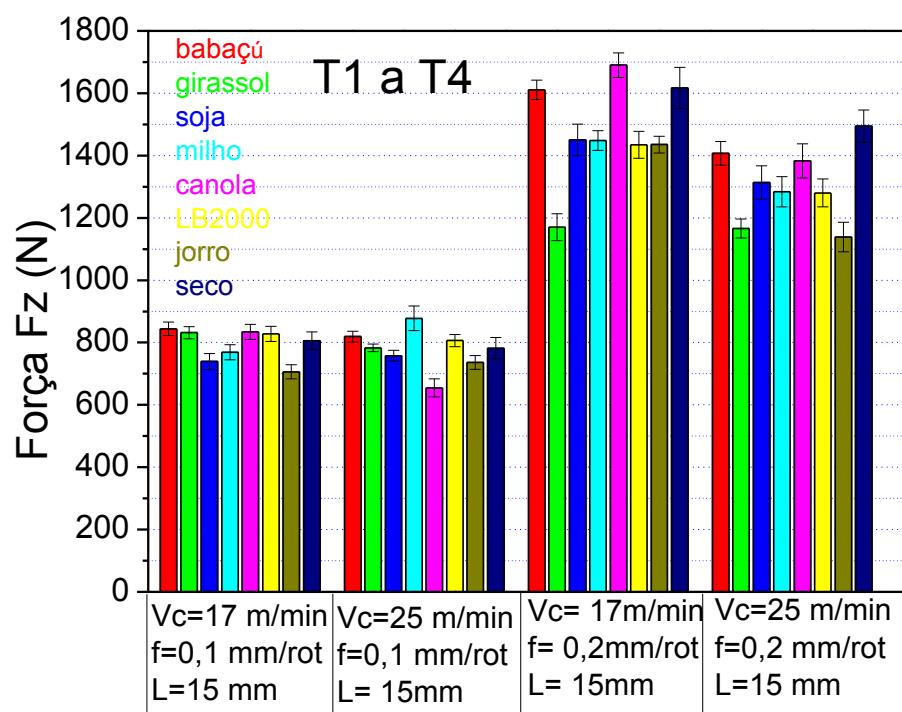


Figura 4.6. Gráfico da média da força F_z e desvio padrão, para cada óleo, jorro e a seco, nos testes 1- 4, $L=1,5 \times D$, $Q=50$ ml/h.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

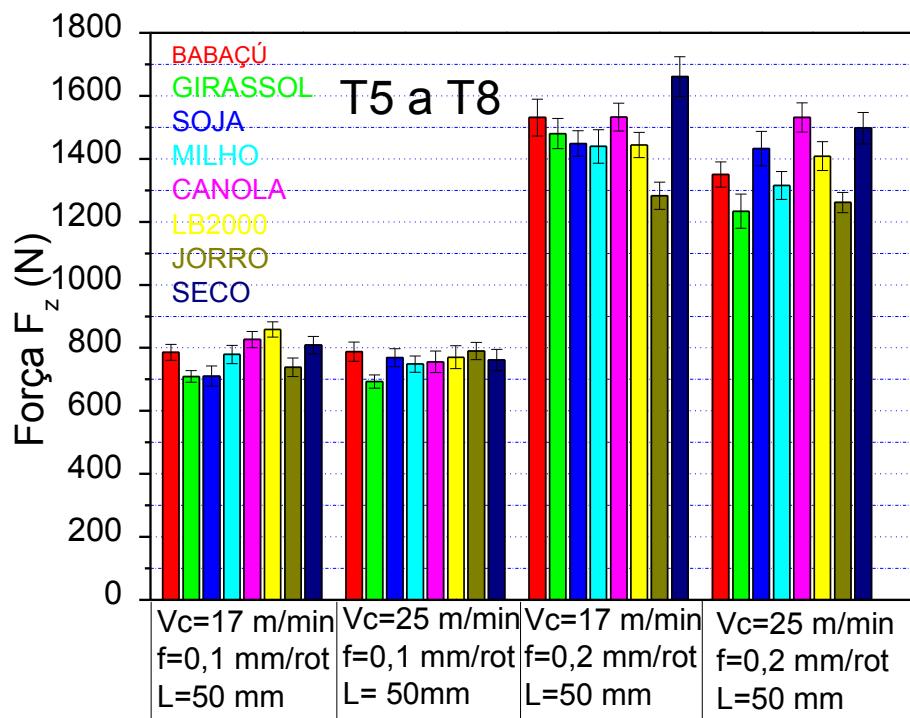


Figura 4.7 - Gráfico da média da força F_z e desvio padrão, para cada óleo, jorro e seco, nos testes 5 - 8, $L = 5 \times D$, $Q = 50 \text{ ml/h}$.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Por esses gráficos pode-se observar a diferença significativa das forças de avanços, quando o avanço passa de 0,1 mm/rot para 0,2 mm/rot. Constata-se também uma leve diminuição da força de avanço quando a velocidade de corte passa de 17 m/min para 25 m/min, o comprimento de corte não influenciou a força. Quanto aos fluidos de corte, a princípio, o óleo de girassol parece destacar-se em relação aos demais.

Para melhor confiabilidade nos resultados e análise mais minuciosa do processo, com a necessidade de comparar os dados pesquisados e influência de cada variável, foi realizada uma análise estatística para verificar se os parâmetros de entrada exercem influência sobre os parâmetros de saída. Para isso foi realizado pelo programa estatístico OringiPro 8.0 o teste da análise de variância (ANOVA), que permite comparar qualquer nº de média de dados obtidos experimentalmente Vieira (2006) interagindo todas as condições de entrada entre si, os óleos comestíveis e as demais aplicações. Permite também realizar o teste de Tukey para comparação das médias duas a duas, que possibilita calcular a diferença mínima que deve haver entre duas médias para que elas possam ser consideradas diferentes a determinado nível de significância (usualmente 5%) VIEIRA (2006) e, consequentemente, determinar o melhor óleo quando se comparar os mesmos dois a dois, e se existir um melhor óleo comestível entre todos, ou se ele for melhor para uma determinada condição.

A Tab. 4.3 mostra o resumo da ANOVA realizado pelo programa estatístico oringiPro8, para os testes 1 a 4, comprimento de corte $L=15 \text{ mm}$, onde o fator A são as

condições de corte e o fator B são todas as aplicações de fluidos e mais a condição a seco, conforme Tab A4 da ANOVA completa do Apêndice

Tabela 4.3 - Resumo da ANOVA para os testes de 1 a 4, L=15 mm.

	nGL	SQ	MQ	F	p
Fator A	3	9,28733E6	3,09578E6	1899,7746	0
Fator B	7	412804,43687	58972,06241	36,18918	0
Interação	21	576288,79456	28728,62109	16,84043	0
Modelo	31	1,02764E7	342883,89832	203,42894	0
Erro	64	104291,17447	1644,93716	--	--
Total	95	1,03807E7	--	--	--

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

A Tab. 4.3 expressa que, ao nível de 5%, a média da população do fator A, a média da população do fator B e as interações entre o fator A e o fator B são significativamente diferentes, ou seja, rejeita-se a hipótese de que as médias são iguais, nesse nível de significância, vide Tabela A4 do Apêndice, gerada pelo programa.

A Tab. 4.4 mostra a comparação dos óleos pelo método de Tukey, para os testes de 1 a 4, L=15 mm, para todas as aplicações consideradas significantes, conforme Tab. A4 da ANOVA do Apêndice.

Tabela 4.4 - Comparação das diferenças das médias pelo método Tukey

	Média 1	Média 2	Diferença	Melhor
Girassol x babaçu	987,67	1170,18	-182,51	Girassol
Soja x babaçu	1065,20	1170,18	-104,98	Soja
Soja x girassol	1065,20	987,67	77,52	Girassol
Milho x babaçu	1094,56	1170,18	-75,62	Milho
Milho x girassol	1094,56	987,67	106,88	Girassol
Canola x girassol	1140,43	987,67	152,76	Girassol
Canola x soja	1140,43	1065,20	75,23	Soja
LB2000 x babaçu	1087,11	1170,18	-83,07	LB2000
LB2000 x girassol	1087,11	987,67	99,44	Girassol
LB2000 x canola	1087,11	1140,43	-53,31	LB2000
Jorro x babaçu	1005,54	1170,18	-164,64	Jorro
Jorro e soja	1005,54	1065,20	-59,65	Jorro
Jorro e milho	1005,54	1094,56	-89,018	Jorro
Jorro e canola	1005,54	1140,43	-134,89	Jorro
Jorro e LB2000	1005,54	1087,11	-81,87	Jorro
A seco e girassol	1174,75	987,67	187,07	Girassol
A seco x soja	1174,75	1065,20	109,55	Soja
A seco x milho	1174,75	1094,56	80,19	Milho
A seco x LB2000	1174,75	1087,11	87,63	LB2000
A seco x jorro	1174,75	1005,54	169,20	Jorro

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

A Tab. 4.2 nos mostra qual é o melhor óleo, considerando-se a redução das forças, quando comparamos dois óleos entre si, segundo o método Tukey. Sendo o sinal da média positivo, o óleo da segunda coluna será melhor, consequentemente, quando o sinal for negativo o óleo da primeira coluna será melhor. No entanto, o resultado desta tabela não informa qual entre todos os óleos é o melhor, ou se existe interação. Um óleo é melhor para uma determinada condição e para outra não. Uma análise geral pode ser feita com a ajuda do gráfico da Fig. 4.8 e Fig. 4.9.

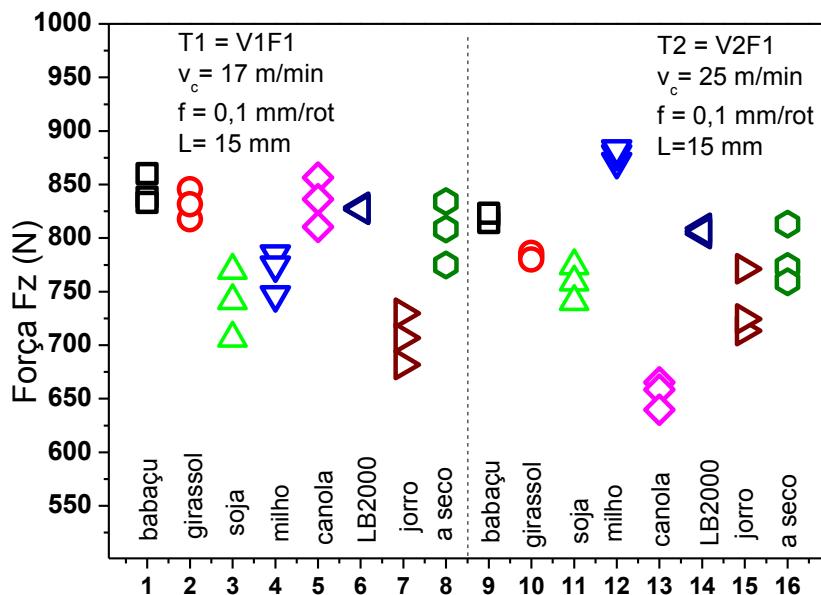


Figura 4.8 - Diagrama de dispersão de crescimento para os dois primeiros tratamentos T1 e T2 para cada óleo em relação às forças de avanço.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

O gráfico da Fig. 4.8 mostra que existe interação, ou seja, não houve um único óleo comestível que apresentasse melhor desempenho entre as condições investigadas. O óleo de soja apresentou menores forças entre os óleos comestíveis investigados para condição T1 e o óleo de canola apresentou menores forças entre os óleos comestíveis investigados para condição T2; sendo assim, dentre os óleos comestíveis o óleo de canola é considerado melhor para condição T2 e o óleo de soja o melhor para condição T1.

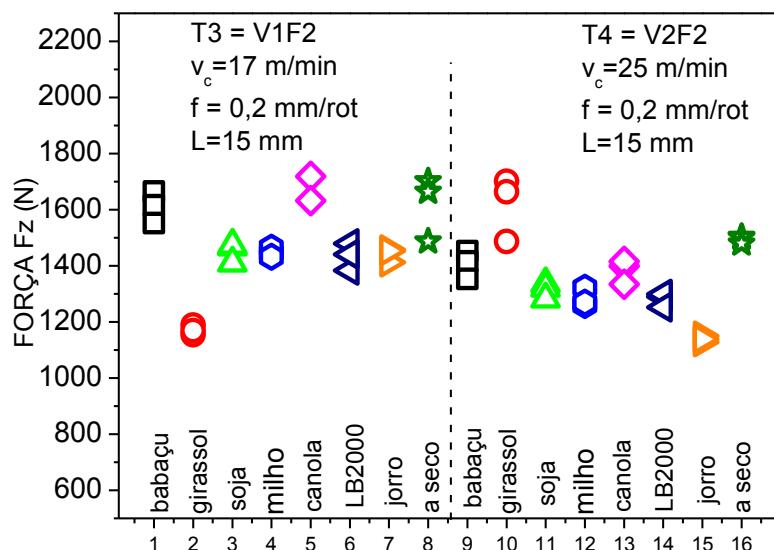


Figura 4.9 - Diagrama de dispersão de crescimento para os dois primeiros tratamentos T3 e T4 para cada óleo em relação às forças de avanço.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

O gráfico da Fig. 4.9 expressa que existe também interação para estas condições, o óleo de girassol apresenta menor força entre os óleos comestíveis investigados para condição T3 e milho o melhor para condição T4.

De maneira geral, dentre os óleos investigados não houve um único óleo que apresentasse melhor desempenho entre as condições investigadas, sendo assim, dentre os óleos comestíveis o óleo de girassol é considerado melhor para condição T3 e o óleo de milho o melhor para condição T4. Para validar a ANOVA analisaram-se os resíduos padronizados. As estimativas de erros recebem o nome de resíduos e é o estudo dessas estimativas, ou seja, é a análise de resíduos que ajuda verificar se a análise de variância feita é aceitável. Vieira (2006), a Fig. 4.10 mostra o gráfico correspondente à esta análise.

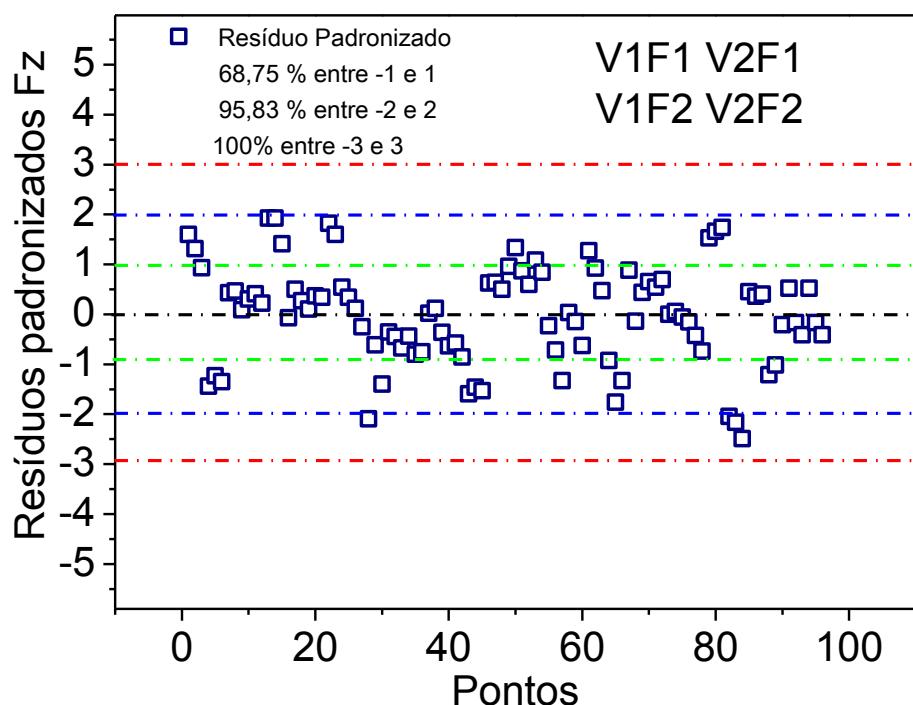


Figura 4.10 - Gráfico dos resíduos padronizados da força de avanço para os testes, T1 a T4 (estimativa de erros).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

A Figura 4.10 mostra que 68,75% dos valores de uma distribuição normal encontram-se dentro da faixa de um desvio padrão, tanto para mais quanto para menos em relação a média, 95,83 % dos valores de uma distribuição normal encontram-se dentro da faixa de dois desvios padrão, tanto para mais quanto para menos em relação à média; 100% dos valores de uma distribuição normal encontram-se dentro da faixa de três desvios padrão, tanto para mais quanto para menos em relação a média. Então, concluiu-se que os pontos estão aleatórios e não houve pontos discrepantes dos dados experimentais, valor muito maior ou muito menor do que o valor esperado ou valores fora do intervalo -3 e +3, logo a análise de variância é aceitável. Não foi necessário realizar ANOVA para os testes de

5 a 8, por que não houve influência significativa nas forças de avanço quando o comprimento do furo aumentou de 15 mm para 50 mm análise feita nas Figs. 4.6 e 4.7.

Para uma análise mais detalhada, e em virtude da grande quantidade de óleos comestíveis testados, no total 05 (cinco), e mais três já existentes na furação, foram analisados os dois óleos (canola e girassol). Eles apresentaram, em uma determinada condição de corte, melhor desempenho, e forma comparados com as aplicações já existentes (A seco, LB2000 e jorro).

4.2.1 Força de avanço canola x usinagem a seco.

As Fig. 4.11 e Fig. 4.12 mostram os gráficos característicos da força de avanço (F_z) em função do tempo (s), para os testes (T1 a T4) e (T5 e T8), respectivamente, na furação do aço ABNT 1045, nos comprimentos $L = 1,5 \times D$ e $L = 5 \times D$ com aplicação de fluido comestível de canola na forma MQF com vazão de 50 ml/h, para ser comparado com a usinagem a seco Fig. 4.13 e Fig. 4.14.

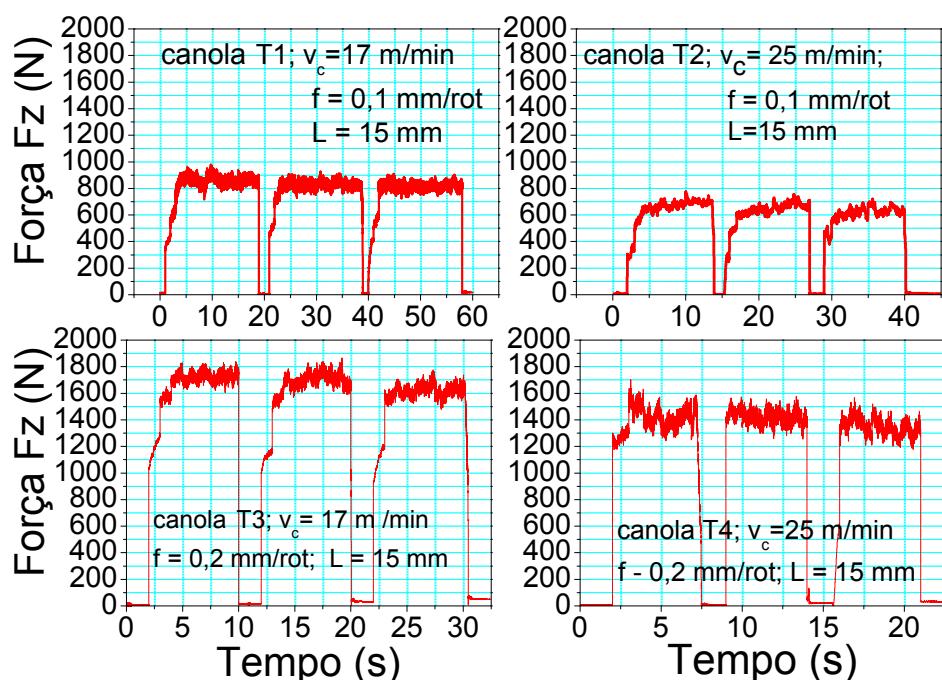


Figura 4.11 - Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T1 a T4 na furação, $L = 1,5 \times D$, $Q = 50$ ml/h, do óleo comestível de canola.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

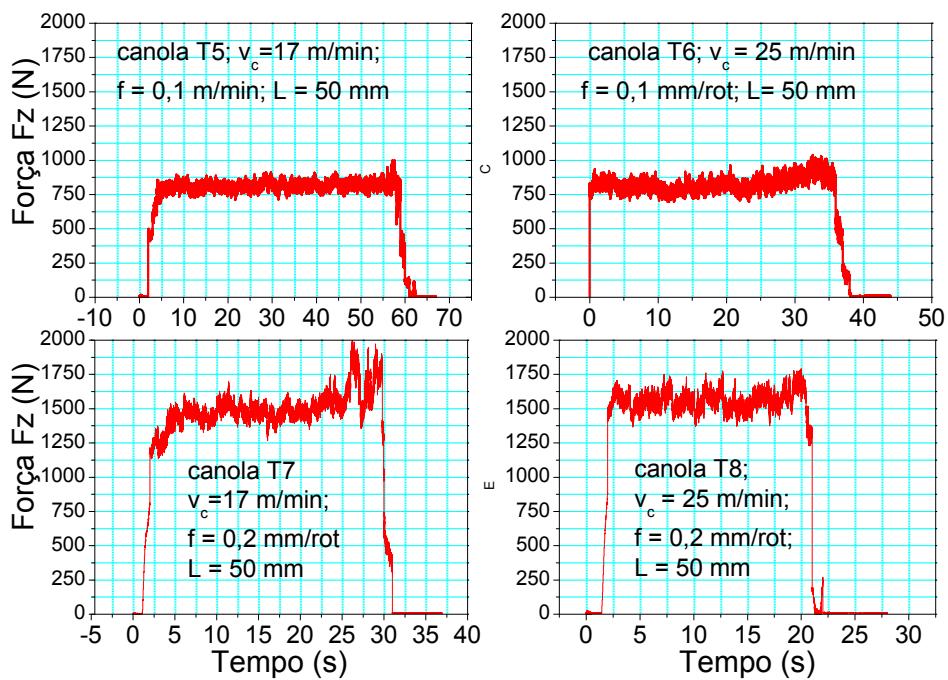


Figura 4.12 - Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T5 a T8 na furação $L = 5 \times D$, $Q = 50$ ml/h, do óleo comestível de canola.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

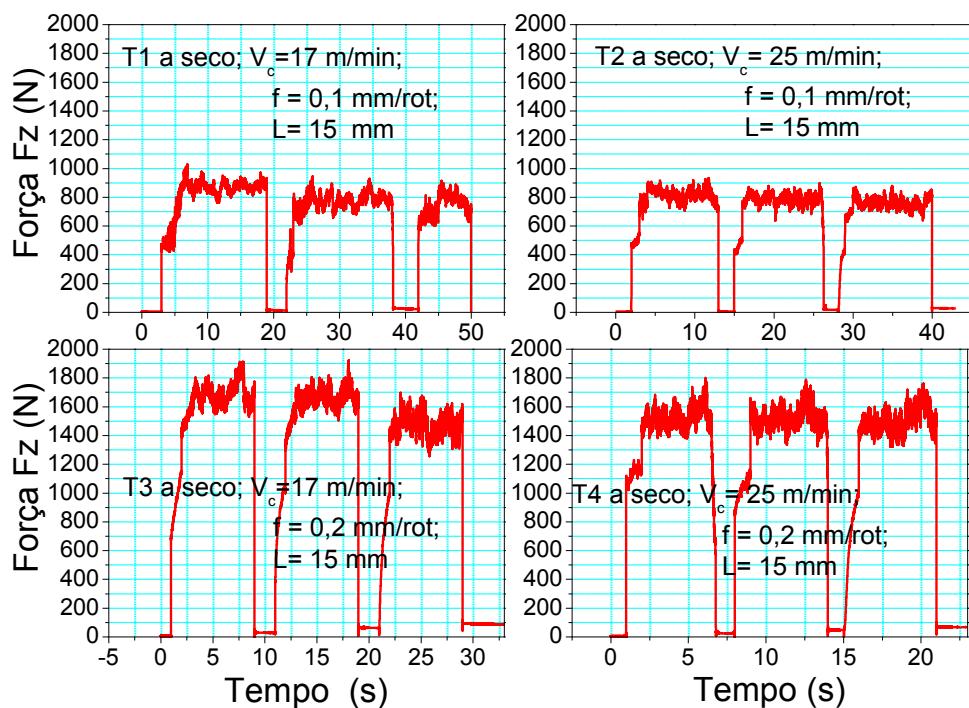


Figura 4.13 - Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T1 a T4 na furação $L = 1,5 \times D$, $Q = 50$ ml/h, a seco.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

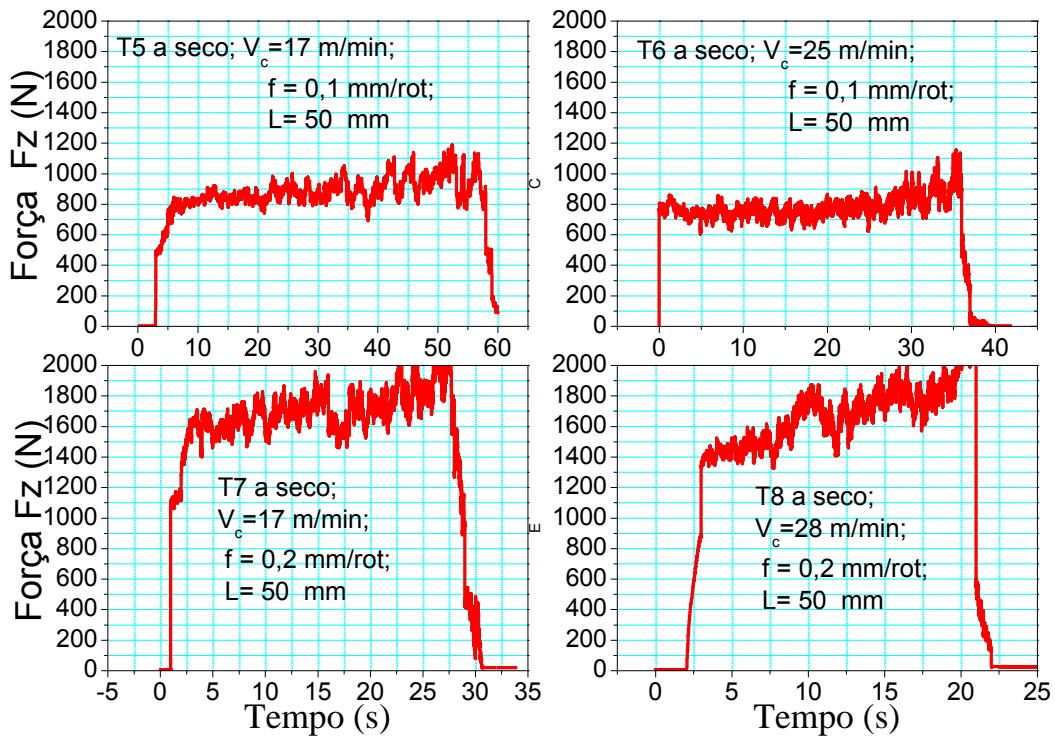


Figura 4.14 - Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T1 a T4 na furação $L = 1,5 \times D$ e $L = 5 \times D$, a seco.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Por esses gráficos pode-se inicialmente observar a influência dos parâmetros de entrada, envolvidos no processo, sendo mais significativa a do avanço (f), pois, conforme a literatura Machado et al. (2004), o aumento do avanço, por aumentar diretamente as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, causará um aumento da força de usinagem, numa proporção direta, quase que linear. Por outro lado, pela maior geração de calor e consequente redução da resistência ao cisalhamento do material nas zonas de cisalhamento, e pela ligeira redução na área de contato cavaco – ferramenta, a força de usinagem tenderá a sofrer uma ligeira redução com o aumento da velocidade de corte. Os efeitos do comprimento de corte (L) e o fluido precisam ser analisados estatisticamente para uma melhor avaliação. Os gráficos dos testes e réplicas de 2 a 9 de canola e girassol, encontram-se nas Figs. 2 a 9 do Apêndice.

Para melhor visualização dos resultados e para efeito de comparação entre os testes em questão na mesma condição do óleo comestível de canola e a usinagem a seco, a Fig. 4.15 (a) mostra o gráfico de barras correspondente às médias e desvios padrão das forças de avanço para os testes de 1 a 4 e a Fig. 4.15 (b) mostra os gráficos correspondentes às médias e desvios padrão dos testes de 5 a 8 conforme Tab. 5 e Tab. 6 do Apêndice, que confirmam a discussão dos parâmetros analisados anteriormente, quando comparados dois a dois e indicam que todos os coeficientes de variação (CV) são menores que 10% validando os resultados, já que, em regras gerais, experimentos feitos em laboratório estes coeficientes não devem ultrapassar os 10% Vieira (2006).

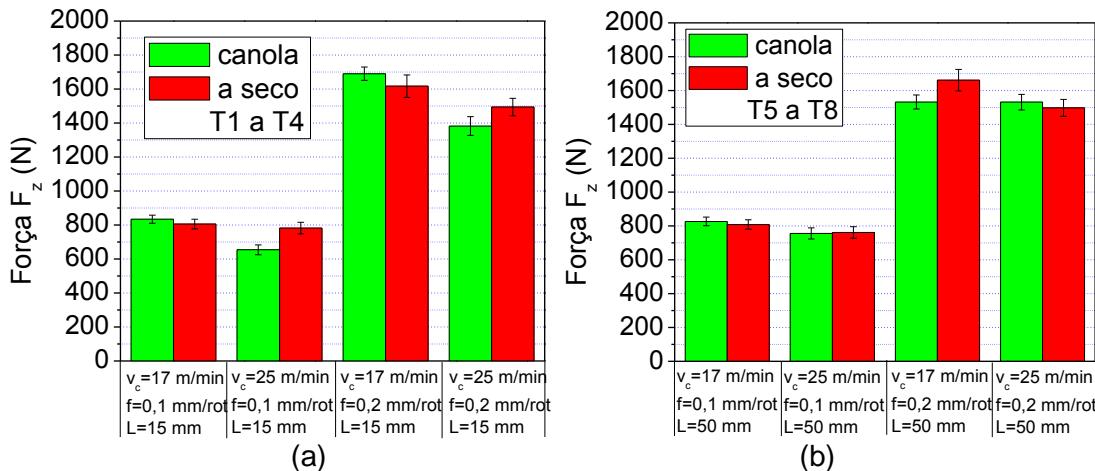


Figura 4.15 - Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço F_z em função dos testes, (a) T1 a T4, (b) T5 a T8 canola MQF, $Q=50 \text{ ml/h}$ x a seco.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Os resultados mostram que a força de avanço aumentará com o aumento do avanço. Também é observada uma pequena redução nas forças de avanço com o aumento da velocidade na maioria das condições Machado et al. (2009). O óleo de canola aplicado na forma de mínima quantidade de fluido (MQF) apresenta resultados similares à condição a seco.

4.2.2 Análise estatística dos dados canola x a seco

A Tab. 4.5 apresenta o resultado da ANOVA feita pelo StatSoFt 7.0 para a força de avanço através do sumário dos principais efeitos médios das variáveis de entrada para óleo de canola e a seco, conforme resultado da matriz de planejamento da Tab. 7 do Apêndice, que reforçam a discussão dos parâmetros analisados anteriormente e ainda indicam que, todos os coeficientes de variação (CV) são menores que 10% validando os resultados. (VIEIRA, 2006).

Tabela 4.5 - Principais efeitos médios das variáveis de entrada canola x a seco.

Canola x a seco	Efeito	P
Média	1165	0,00000
(1) V_c 17-25	-115	0,019135
(2) f 0,1 - 0,2	772	0,000003
(3) L 15-50	14	0,689214
(4) Canola – seco	27	0,451331

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

A Tab. 4.5 demonstra os principais efeitos médios dos parâmetros de entrada onde se destacam a influência significativa do avanço (f) e da velocidade de corte (v_c). Ficou

comprovada pelo índice “p” que as variáveis f e v_c , foram significativas no processo para uma confiabilidade de 95%. Análises de tendências para os efeitos médios poderão ser feitas para essas variáveis, como ilustrado nos gráficos da Figs 4.16 (a), (b), (c) e (d)

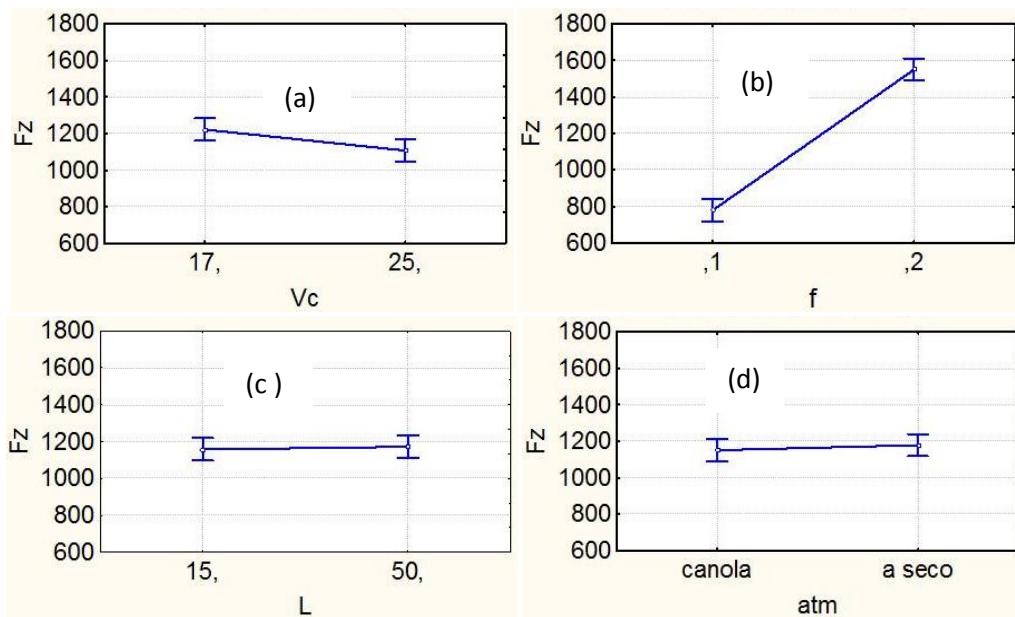


Figura 4.16 - Gráfico de tendências da força de avanço em função: (a) v_c , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Quando a velocidade de corte foi aumentada de 17 m/min para 25 m/min a força de avanço diminuiu em média 115 N (9,87%), Fig 4.16 (a). O aumento do avanço de 0,1 mm/rot. para 0,2 mm/rot. aumentou a força de avanço em média 772 N (66,26%), Fig 4.16 (b). O aumento do comprimento do furo de 15 mm para 50 mm teve em média um aumento discreto na força de avanço em 14 N (1,2%), Fig 4.16 (c). Com a usinagem a seco ao invés da aplicação de óleo de canola na forma MQF, houve um ligeiro aumento na força de avanço, em média de 27 N (2,31%), Fig 4.16 (d), não sendo significativa quando observado o valor de p , mas com uma pequena tendência do óleo de girassol apresentar forças de avanço menores.

4.2.3 Força de avanço canola x LB2000

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram os gráficos característicos da força de avanço (F_z) em função do tempo (s), para os testes T1 a T4 e T5 a T8 respectivamente, na furação do aço ABNT 1045, nos comprimentos $L = 1,5 \times D$ e $L = 5 \times D$ do fluido vegetal comercial LB2000 na forma MQF com vazão de 50 ml/h para serem comparados com o óleo comestível de canola, Figuras. 4.11 e 4.12 aplicados também na forma MQF já apresentado anteriormente.

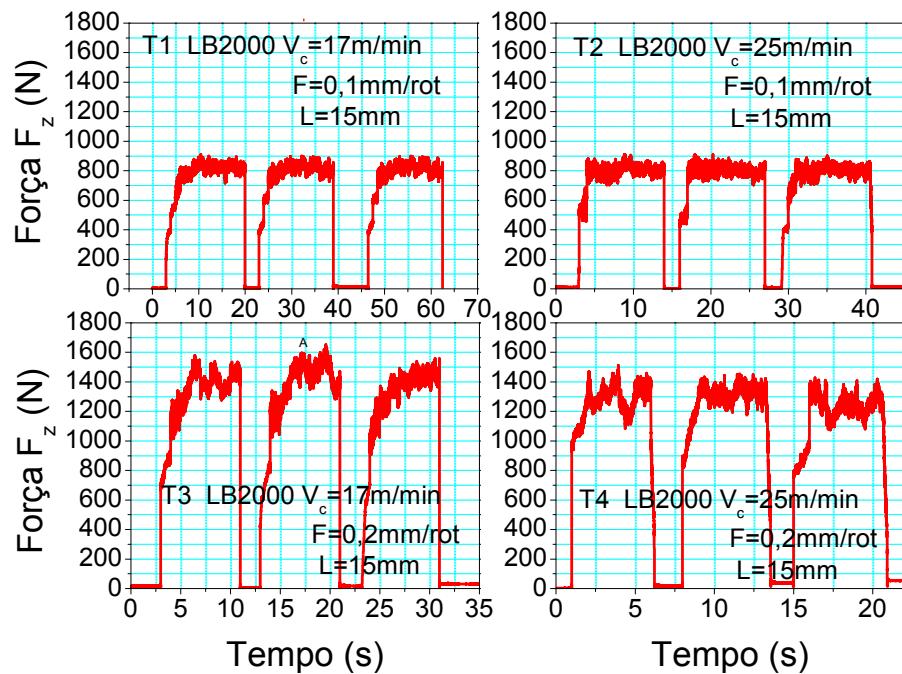


Figura 4.17 - Gráfico da força de avanço F_z em função do tempo, das condições T1 a T4 na furação $L = 1,5 \times D$, fluido vegetal comercial LB2000.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

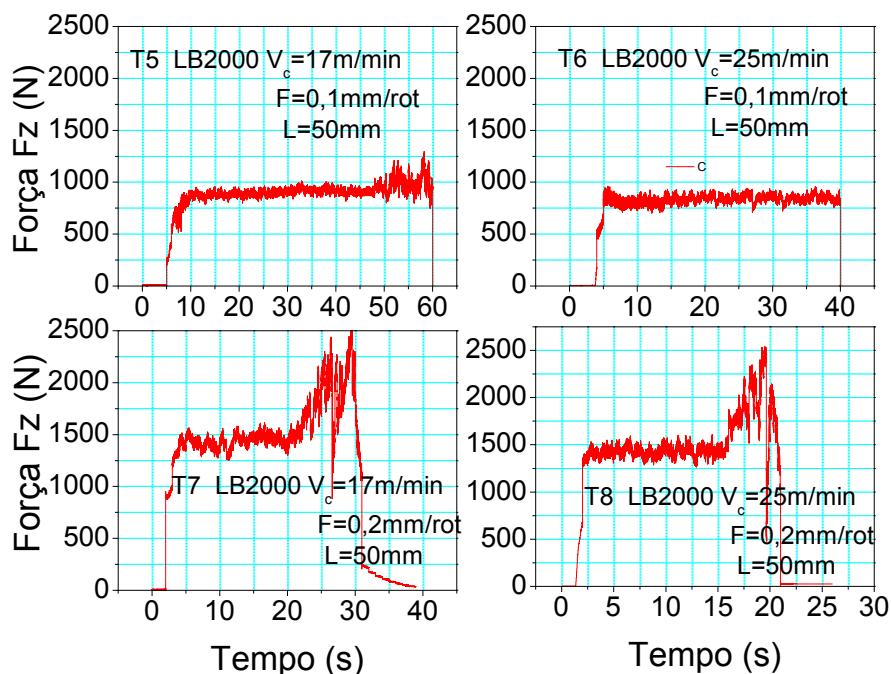


Figura 4.18 - Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T5 a T8 na furação $L=5xD$, fluido vegetal comercial LB2000.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Nestes gráficos pode-se observar também a influência dos parâmetros de entrada, envolvidos no processo, sendo mais significativo o efeito do avanço (f). A força de usinagem tende a sofrer uma ligeira redução com o aumento da velocidade de corte Machado et al. (2009). O aumento da força de avanço no final do furo com profundidade de

50 mm, apresentados nos dois últimos gráficos, é provavelmente devido à dificuldade de saída do cavaco, uma característica do processo. (CASTRO, 2001). O efeito do comprimento de corte (L) e do fluido precisam também ser analisados estatisticamente para uma melhor avaliação.

A Fig. 4.19 mostra o gráfico de barras correspondente às essas médias (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8, conforme Tab. 5 e Tab. 7 do Apêndice para efeito de comparação entre o uso de fluido comestível de canola e o já existente fluido comercial LB2000 que reforçam a discussão dos parâmetros analisados anteriormente e ainda indicam que todos os coeficientes de variação (CV) são menores que 10%, validando os resultados Vieira (2006).

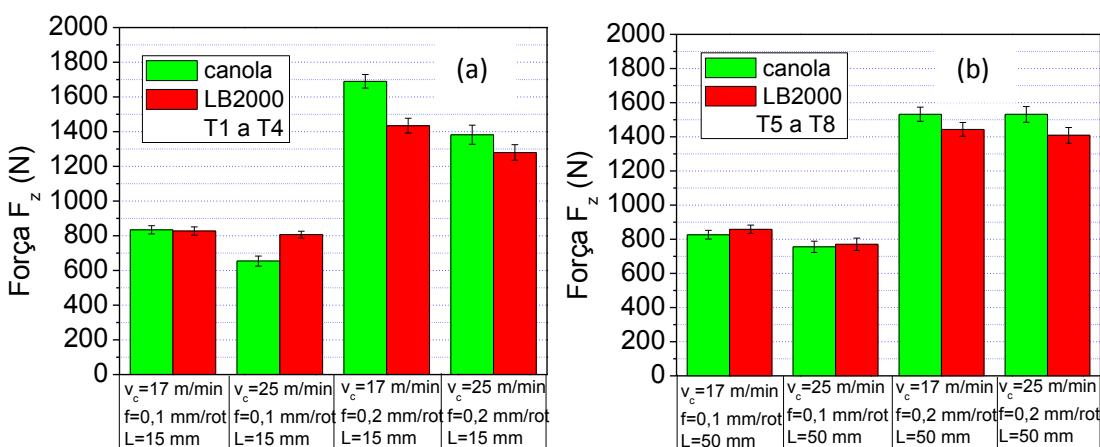


Figura 4.19 - Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço F_z em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 canola MQF, $Q=50$ ml/h e LB2000.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Nas Figs. 4.19 (a) e (b) é também destacado que a força de avanço aumenta com o aumento do avanço como nos outros casos apresentados. Com o aumento da velocidade de corte é também observada uma pequena redução nas forças de avanço, Machado et al. (2009), levando-se em consideração o mesmo fluido. A aplicação do óleo de canola na forma de mínima quantidade de fluido (MQF), quando comparado na mesma condição com aplicação do fluido LB2000, também na forma de mínima quantidade (MQF), apresentou, na maioria das condições, maiores forças de avanço. Os valores da força de avanço média estão em torno de 750 N para avanços de 0,1 mm/rot e aumentando para cerca de 1400 N para avanços de 0,2 mm/rot.

4.2.4 Análise estatística dos dados canola x LB2000.

A Tabela 4.6 apresenta o resultado da ANOVA para a força de avanço através do sumário dos principais efeitos médios das variáveis de entrada, conforme resultado da matriz de planejamento canola x LB2000 Tab. A11 do Apêndice.

Tabela 4.6 - Principais efeitos médios das variáveis de entrada canola x LB2000

Canola x LB2000	Efeito	P
Média	1127	0,000000
(1) V_c 17 - 25	-107	0,021770
(2) f 0,1 - 0,2	672	0,000005
(3) L 15 - 50	27	0,443950
(4) Canola – LB2000	-47	0,207162
2×4	-95	0,033

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

A Tab. 4.6 expressa os principais efeitos médios dos parâmetros de entrada onde se destacam a influência significativa do avanço (f), da velocidade de corte V_c e da interação avanço com atmosfera. Ficou comprovada, pelo índice “p”, que as variáveis f , V_c e a interação avanço versus atmosfera foram significativas no processo para uma confiabilidade de 95%. Análises de tendências para os efeitos médios podem ser feitas para essas variáveis, como ilustrado nos gráficos da Figura 4.20 (a), (b), (c) e (d).

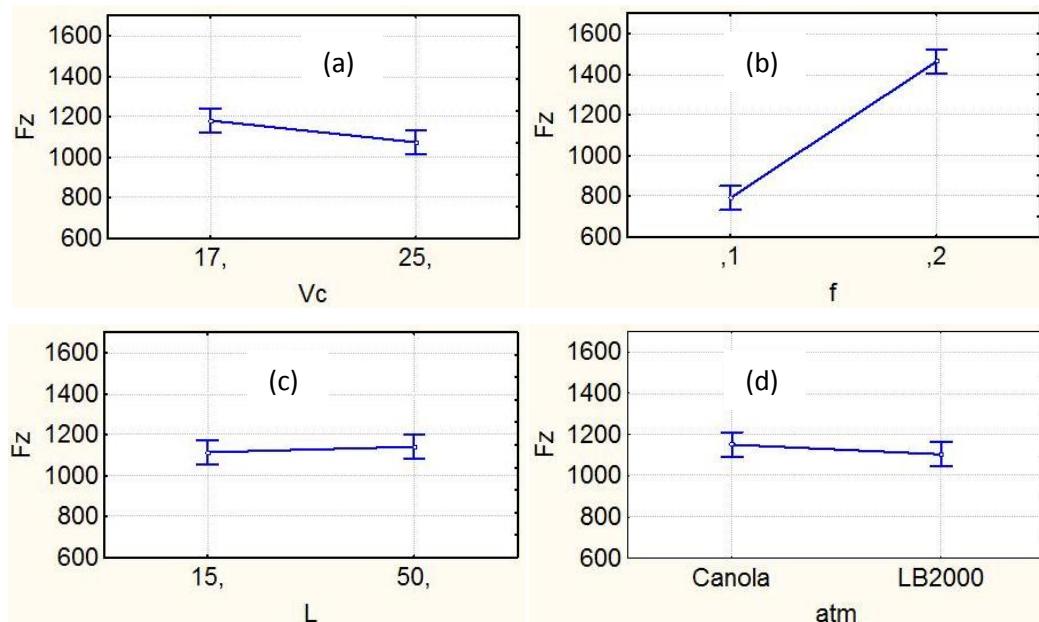


Figura 4.20 - Gráfico de tendência da força de avanço em função: (a) V_c , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Quando a velocidade de corte foi aumentada de 17 m/min para 25 m/min a força de avanço diminuiu em média 107 N (9,49%), Fig. 4.20 (a). O aumento do avanço de 0,1 mm/rot. para 0,2 mm/rot. aumentou a força de avanço em média 672 N (59,62%) Fig. 4.20 (b). O aumento do comprimento do furo de 15 mm para 50 mm teve em média um aumento discreto na força de avanço em 27 N (2,39%), Fig. 4.20 (c). Com aplicação de fluido LB2000

ao invés do óleo de canola, houve uma diminuição na força de avanço, em média de 47 (N) 4,17 % Fig. 4.20 (d) não sendo significativa quando observado o valor de p , mas com tendência de apresentar forças de avanço menores. A interação avanço versos atmosfera apresentou uma diminuição nas forças de avanço em média 95 (N) 8,42%, sendo significativa quando se observa o valor de p no processo. O que mostra que a capacidade do LB2000 em reduzir a força de avanço é acentuada quando se usina com o avanço maior.

4.2.5 Força de avanço canola x jorro

As Figs. 4.21 e 4.22 expressam os gráficos característicos da força de avanço (F_z) em função do tempo (s), para os testes T1 a T4 e T5 e T8, respectivamente, na furação do aço ABNT 1045, nos comprimentos $L = 1,5 \times D$ e $L = 5 \times D$ do fluido em abundância (jorro) para ser comparado com aplicação de fluido comestível de canola na forma MQF com vazão de 50 ml/h, Figs. 4.11 e 4.12 já apresentadas anteriormente.

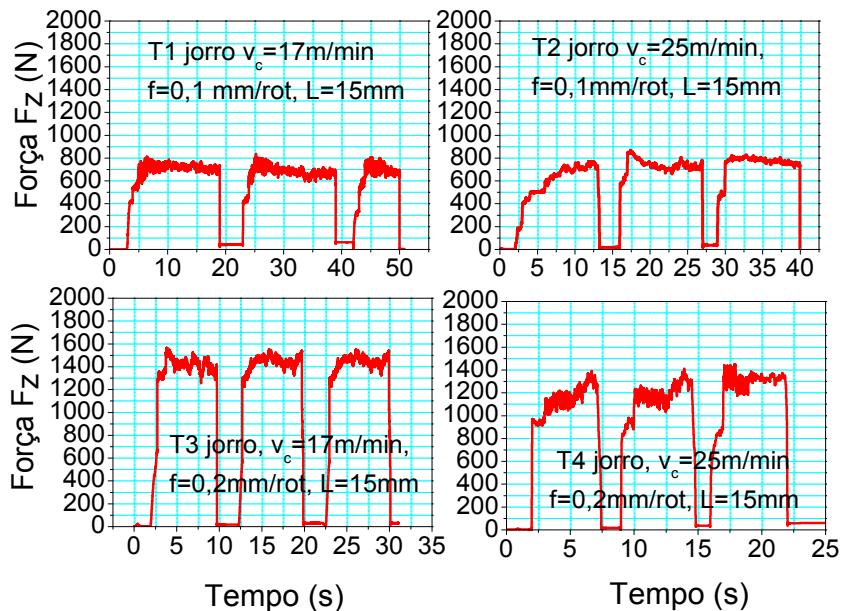


Figura 4.21. Gráfico da força F_z em função do tempo, das condições T1 a T4 na furação $L = 1,5 \times D$, fluido em abundância (jorro).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

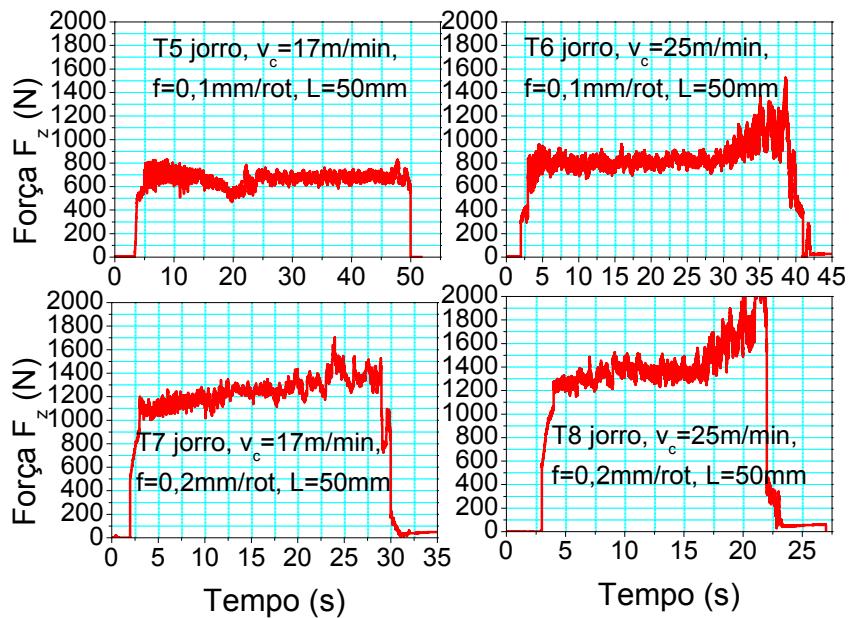


Figura 4.22 - Gráfica da força (F_z) em função do tempo, das condições T5 a T8 na furação, $L = 5 \times D$, fluido em abundância (jorro).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Por esses gráficos pode-se constatar também a influência dos parâmetros de entrada, envolvidos no processo, sendo mais significativa a do avanço (f), como nos casos anteriores, a força de usinagem tende a sofrer uma ligeira redução com o aumento da velocidade de corte Machado et al (2009). O aumento da força de avanço no final do furo com profundidade de 50 mm apresentados nos dois últimos gráficos é provavelmente devido a dificuldade de saída do cavaco, uma característica do processo, Castro (2001). O comportamento do comprimento de corte (L) e o fluido precisam também ser analisados estatisticamente para uma melhor avaliação.

A Fig. 4.23 mostra o gráfico de barras correspondente às médias e desvios padrão da força de avanço dos testes (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8, para efeito de comparação entre o uso de fluido comestível de canola e o já existente furação com fluido em abundância (jorro) conforme Tab. A5 e Tab. A8 do Apêndice. O gráfico reforça a discussão dos parâmetros analisados anteriormente e ainda indica que todos os coeficientes de variação (CV) são menores que 10%, validando-se os resultados de Vieira (2006).

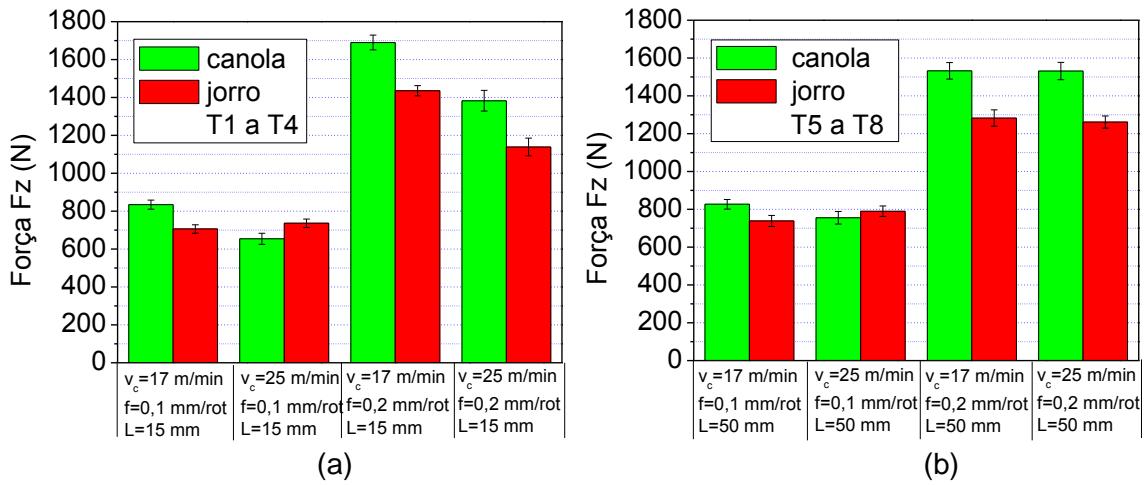


Figura 4.23 - Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço Fz em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 canola MQF, Q=50 ml/h e jorro.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Nestas figuras é também destacado que a força de avanço aumenta com o aumento do avanço como em todos os casos apresentados. Com o aumento da velocidade de corte é também observado uma pequena redução nas forças de avanço considerando o mesmo fluido. A aplicação do óleo de canola na forma de mínima quantidade de fluido (MQF) quando comparados na mesma condição com aplicação de fluido em abundância (jorro), apresentou na maioria das condições maiores forças de avanço e que pode ser confirmado pela análise estatística, estando os valores da força de avanço média em torno de 750 N para avanços de 0,1 mm/rot e aumentando em torno de 1400 N para avanços de 0,2 mm/rot.

4.2.6 Análise estatística dos dados canola x jorro

A Tab. 4.7 apresenta a análise ANOVA (atatSoft 7.0) para a força de avanço através do sumário dos principais efeitos médios das variáveis de entrada, conforme resultados da matriz de planejamento Tab. 12 apêndice.

Tabela 4.7 - Principais efeitos médios das variáveis de entrada canola x jorro.

Canola x jorro	Efeito (N)	P (%)
Média	1081	0,00000
(1) V_c 17 – 25	-99	0,028247
(2) f 0,1 – 0,2	652	0,000006
(3) L 15 – 50	18	0,612449
(4) Canola x jorro	-139	0,007703
(1) X (3)	89	0,040988
(2) X (4)	-115	0,016757

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

A Tab. 4.7 aponta os principais efeitos médios dos parâmetros de entrada, ficando comprovada pelo índice “p” a influência significativa do avanço (f), da velocidade de corte V_c , da atmosfera, da interação da velocidade de corte versus o comprimento do furo e da interação avanço com atmosfera no processo para uma confiabilidade de 95%. Análises de tendências para os efeitos médios podem ser feitas para essas variáveis, como ilustrado nos gráficos da Fig. 4.24 (a), (b), (c) e (d).

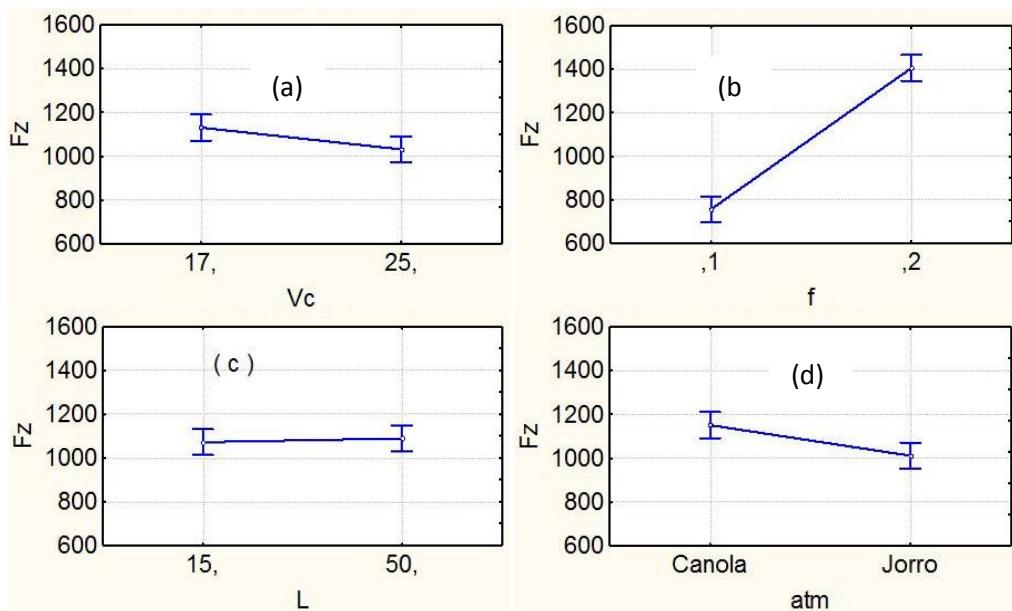


Figura 4.24 - Gráfico de tendências da força de avanço em função: (a) V_c , (b) f, (c) L, (d) atmosfera.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Quando a velocidade de corte V_c foi aumentada de 17 m/min para 25 m/min a força de avanço diminuiu em média 99 N (9,15 %), Fig. 4.24 (a), como nos casos anteriores. O aumento do avanço de 0,1 mm/rot. para 0,2 mm/rot. aumenta em média 652 N (60,31 %), Fig. 4.24 (c). O aumento do comprimento do furo de 15 mm para 50 mm teve em média um aumento discreto na força de avanço em 18 N (1,66 %), Fig. 4.24 (c). Com o uso do fluido em abundância (jorro) ao invés do óleo de canola, houve uma diminuição da força de avanço, em média de 139 N (12,85 %), Fig. 4.24 (d). A combinação (1-3) velocidade de corte V_c maior e comprimento L com furos mais profundos provoca um aumento significativo na força de avanço em 89 N (8,23%) e a combinação (2 - 4) avanço f menor e a presença de fluido diminuiu em média a força de avanço 115 N (10,63 %).

4.2.7 Forças de avanço: girassol x a seco

As Figs. 4.25 e 4.26 mostram os gráficos característicos da força de avanço (F_z) em função do tempo (s), para os testes a) T1 e T4 e b) T5 e T8 respectivamente na furação do

aço ABNT 1045, nos comprimentos $L = 1,5 \times D$ e $L = 5 \times D$ do óleo vegetal girassol na forma MQF com vazão de 50 ml/h para ser comparado com a usinagem a seco já apresentada anteriormente.

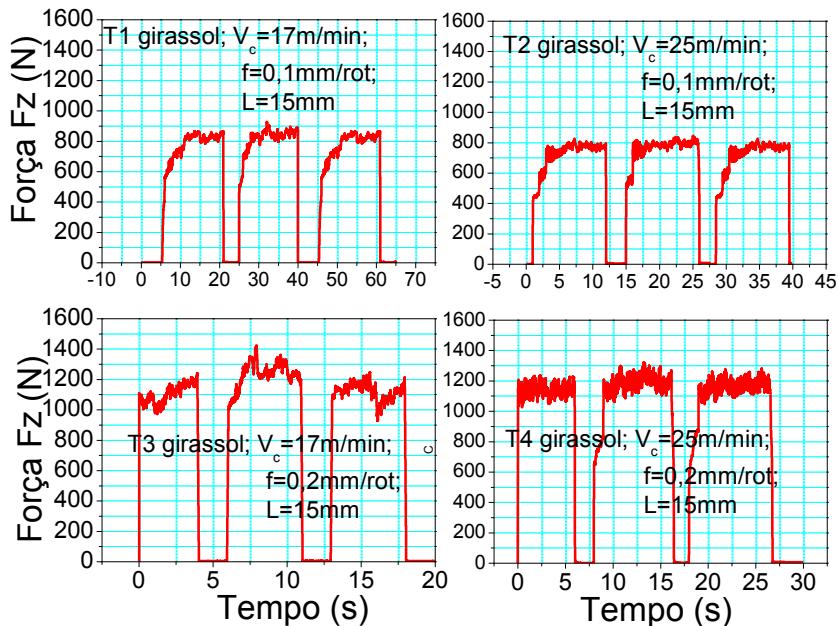


Figura 4.25 - Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T1 a T4 na furação $L = 1,5 \times D$ girassol MQF, $Q = 50$ ml/h.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

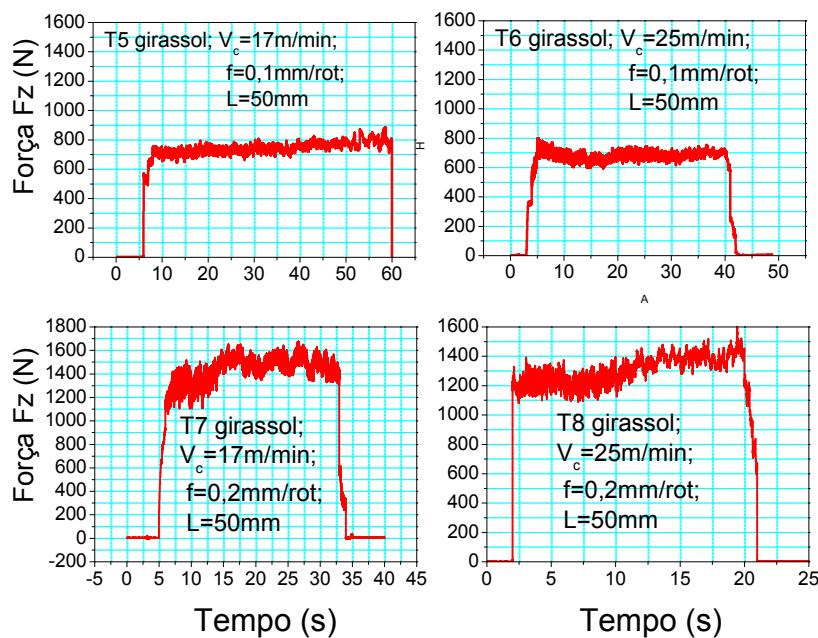


Figura 4.26 - Gráficos da força F_z em função do tempo, das condições T5 a T8 na furação, $L = 5 \times D$, girassol MQF, vazão = 50 ml/h.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Nesses gráficos pode-se observar a influência dos parâmetros de entrada, envolvidos no processo, sendo mais significativa a do avanço (f). A força de usinagem

tenderá a sofrer uma ligeira redução com o aumento da velocidade de corte. O efeito do comprimento de corte (L) e o fluido precisam ser analisados estatisticamente para uma melhor avaliação.

A Fig. 4.27 mostra o gráfico de barras correspondente às médias e desvios padrão das forças de avanço dos testes (a) 1 a 4 e (b) 5 a 8 comparados na mesma condição, conforme Tab. 6 e Tab. 9 do Apêndice, que reforçam a discussão dos parâmetros analisados anteriormente e ainda indicam todos os coeficientes de variação (CV) são menores que 10% validando os resultados. (VIEIRA, 2006).

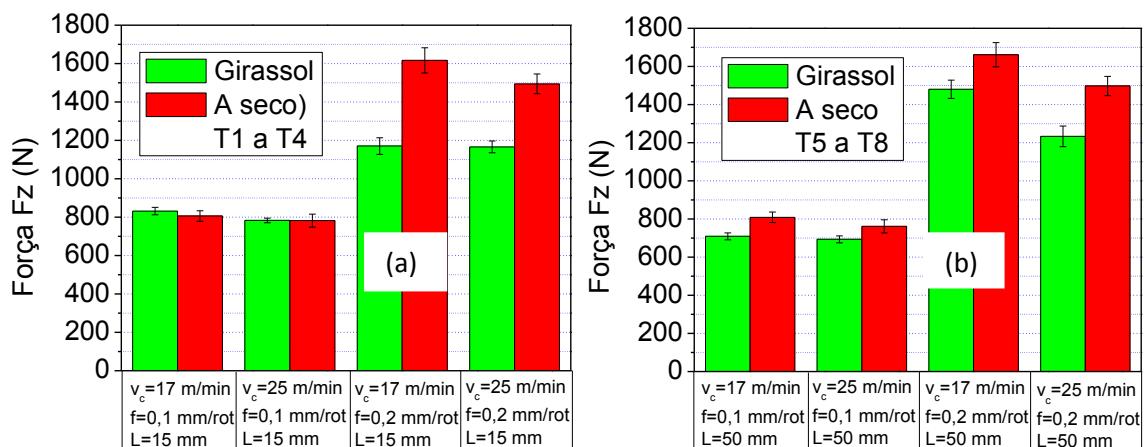


Figura 4.27 - Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço Fz em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 girassol MQF Q=50 ml/h e a seco.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Nas Figs. 4.27 (a) e (b) é destacado também que a força de avanço aumenta com o avanço, visto que o aumento do avanço significa aumento da área a ser cisalhada, como discutido anteriormente. A aplicação do fluido de corte girassol na forma MQF quando comparados na mesma condição da usinagem a seco, apresentou em geral um melhor resultado, ou seja, valores de força de avanço menores, estando os valores da força de avanço média em torno de 800 (N) para avanços de 0,1 mm/rot e aumentando em torno de 1500 (N) para avanços de 0,2 mm/rot.

4.2.8 Análise estatística dos dados girassol x a seco

A Tab. 13 do Apêndice apresenta o resultado da matriz de planejamento e a Tab 4.8 apresenta o resultado da análise ANOVA (statSoft 7.0) para a força de avanço, através do resumo dos efeitos médios entre girassol e a seco.

Tabela 4.8 - Principais efeitos médios das variáveis de entrada girassol x a seco

Gir x a seco	Efeito	P
Média	1093	0,000000
(1) V_c 17 – 25	-84	0,075171
(2) F 0,1 – 0,2	644	0,000012
(3) L 15 – 50	24	0,547146
(4) Atm	170	0,006141
2 x 4	135	0,015228

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

A Tab. 4.8 mostra os principais efeitos dos parâmetros de entrada onde se destacam a influência do avanço (f) e da atmosfera. Ficou comprovada pelo índice “p” que as variáveis f , atmosfera e a interação do avanço (f) com atmosfera, foram significativas no processo para uma confiabilidade de 95% como. Análises de tendências podem ser feitas para essas variáveis, como ilustrado nos gráficos da Fig 4.28 (a), (b), (c) e (d).

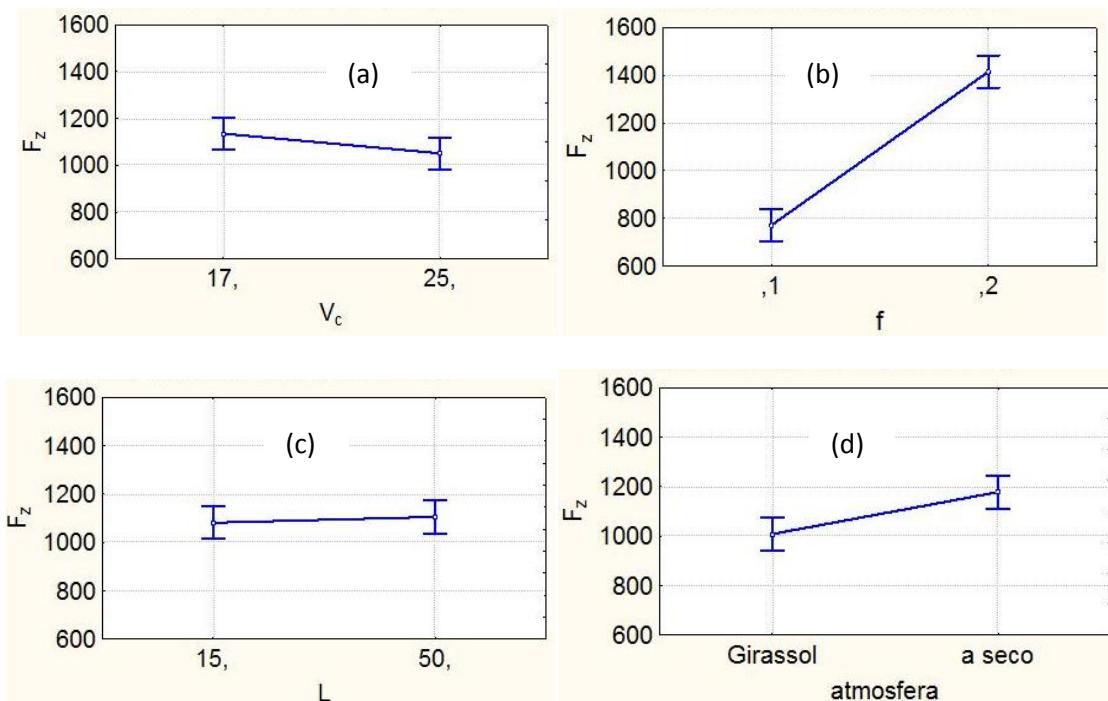


Figura 4.28 - Gráfico de tendências das estimativas de efeitos médios dos parâmetros de entrada (a) V_c , (b) f , (c) L , (d)atmosfera.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Quando a velocidade de corte foi aumentada de 17 m/min para 25 m/min a força de avanço diminuiu em média 84 N (7,68%) Fig 4.28 (a), provavelmente devido à maior geração de calor, provocando dessa forma um aumento da temperatura, que contribui para diminuição da resistência a cisalhamento do material e, portanto, da força de avanço. O aumento do avanço de 0,1 mm/rot. para 0,2 mm/rot. aumenta em média 644 N (58,42%) Fig.

4.28 (b), possivelmente por aumentar a área de contato peça-ferramenta. O aumento do comprimento do furo de 15 mm para 50 mm teve em média um aumento discreto na força de avanço em 24 N (2,2%) Fig. 4.28 (c). Com o uso do óleo de girassol houve uma diminuição na força de avanço em comparação com a usinagem a seco, em média de 170 N (15,55%) Fig. 4.28 (d). Este fato poderá ser atribuído à lubrificação do óleo, diminuindo o atrito entre a peça e a ferramenta. A tabela indica ainda que as variáveis (2) avanço, (4) atmosfera e a combinação desses dois parâmetros (2 x 4) foram significativas, adotando-se o nível de significância de 5%, com o valor de p menor que este nível; portanto, conclui-se que existe diferença entre os dois fatores para uma confiabilidade de 95%, destacando-se também a velocidade de corte na diminuição das forças de avanço.

4.2.9 Força de avanço girassol x LB2000

A Fig. 4.29 (a) mostra o gráfico de barras correspondente às médias e desvio padrão dos testes de 1 a 4 e a Fig. 4.29 (b) para os testes de 5 a 8, comparando-se o efeito dos dois fluidos utilizados, conforme Tab. 7 e 9 do Apêndice. Nessas tabelas todos os coeficientes de variação (CV) são menores que 10%, validando os resultados.

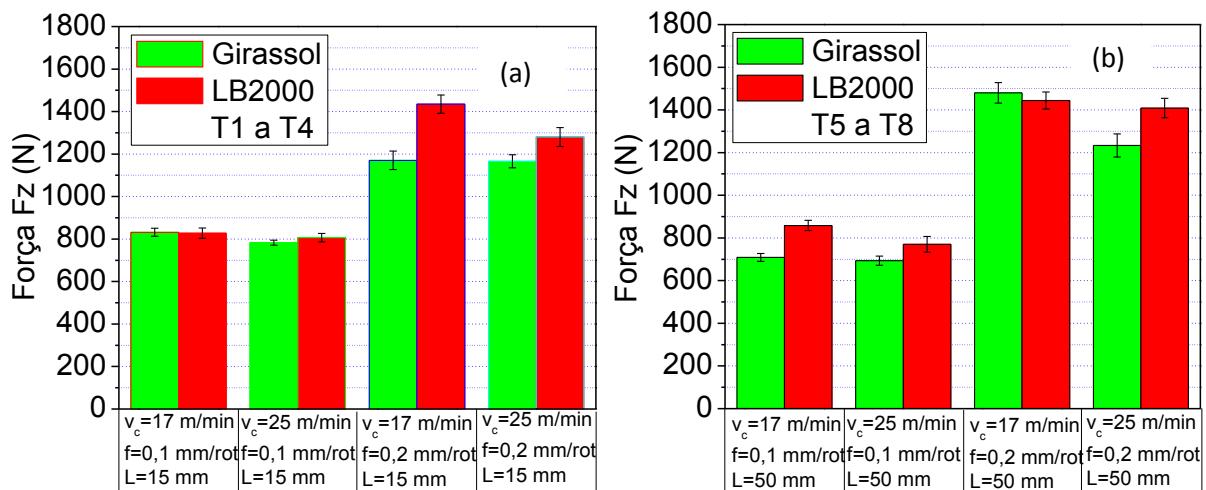


Figura 4.29 - Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço F_z em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 girassol e LB2000, MQF, $Q = 50$ ml/h comparados na mesma condição.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Nas Figs. 4.29 (a) e (b) é também destacado que a força de avanço aumentará com o aumento do avanço. Com o aumento da velocidade de corte é também observada uma pequena redução nas forças de avanço. A aplicação do fluido de corte girassol na forma MQF, quando comparadas na mesma condição ao fluido LB2000, apresentou em geral um melhor resultado, isto é, valores de força de avanço menores, estando os valores da força de avanço média em torno de 750 (N) para avanços de 0,1 mm/rot e aumentando em torno de 1400 (N) para avanços de 0,2 mm/rot.

4.2.10 Análise estatística dos dados girassol x LB2000.

A Tabela 4.9 apresenta o resultado da análise ANOVA para a força de avanço através do sumário dos principais efeitos médios das variáveis de entrada e a Tab. 14 do apêndice mostra os resultados da matriz de planejamento, gerados pelo StatSoft 7.0

Tabela 4.9 - Principais efeitos médios das variáveis de entrada girassol x LB2000.

Gir x LB2000	Efeito	P
Média	1056	0,000000
(1) Vc 17 - 25	-77	0,1094595
(2) f 0,1 - 0,2	542	0,000037
(3) L 15 - 50	37	0,3893874
(1) Girassol – LB2000	95	0,060663

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Nesta Tab 4.9 observam-se os principais efeitos médios dos parâmetros de entrada onde se destacam a influência significativa apenas do avanço (f). Ficou comprovada pelo índice “p” que apenas a variável f foi significativa no processo para uma confiabilidade de 95%. Análises de tendências para os efeitos médios podem ser feitas para essas variáveis, como ilustrado nos gráficos da Fig 4.30, (a), (b), (c) e (d).

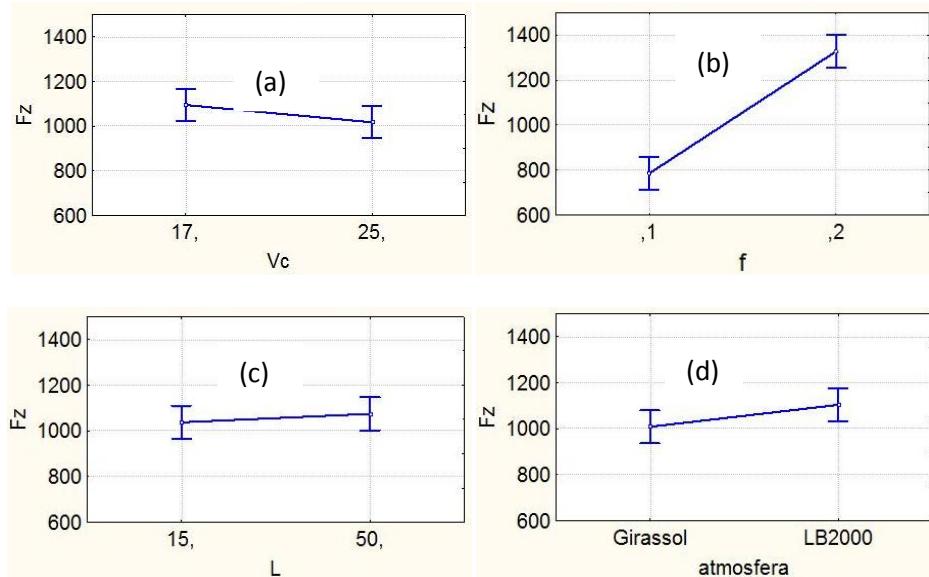


Figura 4.30 - Gráfico de tendências da força de avanço em função: (a) v_c , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Quando a velocidade de corte foi aumentada de 17 m/min para 25 m/min a força de avanço diminuiu em média 77 N (7,29%), Fig. 4.30 (a). O aumento do avanço de 0,1

mm/rot. para 0,2 mm/rot. aumentou a força de avanço em média 542 N (51,32%), Fig. 4.30 (b). O aumento do comprimento do furo de 15 mm para 50 mm teve em média um aumento discreto na força de avanço em 37 N (3,5%), Fig. 4.30 (c). Com o uso do óleo de LB200 houve um aumento na força de avanço em comparação com o óleo de girassol, em média de 95 N (9%) Fig 4.30 (d) não sendo significativa quando se observa o valor de p , mas com uma tendência do óleo de girassol apresentar menores forças de avanço em relação ao fluido vegetal comercial LB2000.

4.2.11 Força de avanço girassol x fluido em abundância (jorro).

As Figs. 4.31 (a) e (b) mostram o gráfico de barras correspondente às médias e desvios padrão das forças de avanços do óleo de girassol e aplicação de fluido em abundância (jorro) para os testes de 1 a 4 e 5 a 8 conforme Tab. 15 do Apêndice comparados na mesma condição, que confirmam a discussão dos parâmetros analisados anteriormente. Nessas tabelas todos os coeficientes de variação (CV) também são menores que 10%, validando-se os resultados.

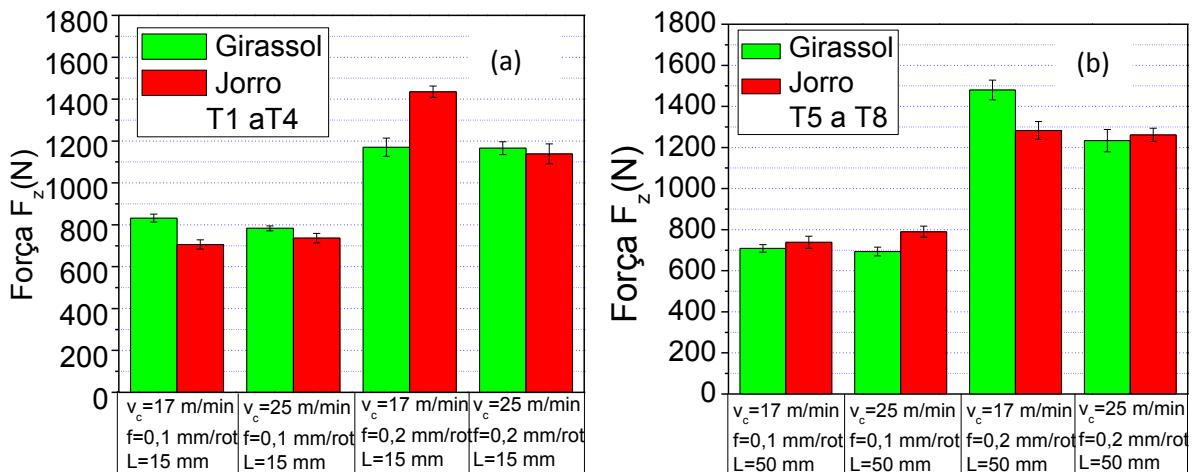


Figura 4.31 - Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço F_z em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 girassol MQF, $Q=50$ ml/h e fluido em abundância (jorro) comparados na mesma condição.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Nas Figs. 4.31 (a) e (b) é também destacado que a força de avanço aumentará com o aumento do avanço. Com o aumento da velocidade de corte é também observado uma pequena redução nas forças de avanço na maioria das condições, o que está de acordo com a literatura. A aplicação do fluido de corte girassol na forma MQF, quando comparadas na mesma condição com aplicação de fluido em abundância (jorro), apresentou em geral resultados equilibrados, ou seja: valores de força de avanço equivalentes, estando os valores da força de avanço média em torno de 750 (N) para avanços de 0,1 mm/rot e aumentando em torno de 1250 (N) para avanços de 0,2 mm/rot.

4.2.12 Análise estatística dos dados: girassol x jorro

A Tab. 4.10 apresenta os resultados da análise ANOVA para a força de avanço através do sumário dos principais efeitos médios das variáveis de entrada conforme resultado da matriz de planejamento girassol x jorro da Tabela 15 do apêndice.

Tabela 4.10 - Principais efeitos médios das variáveis de entrada girassol x jorro.

Girassol x jorro	Efeito	P
Média	1010	0,000000
(1) V_c 17 - 25	-69	0,288095
(2) f 0,1 - 0,2	522	0,000283
(3) L 15 - 50	28	0,653545
(4) Atm (gir - jorro)	3	0,964529

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Destaca-se a influência significativa do avanço (f). Ficou comprovada pelo índice “p”, que a variável f foi significativa no processo para uma confiabilidade de 95%. Análises de tendências para os efeitos médios podem ser feitas para essas variáveis, como ilustrado nos gráficos da Figs. 4.32, (a), (b), (c) e (d).

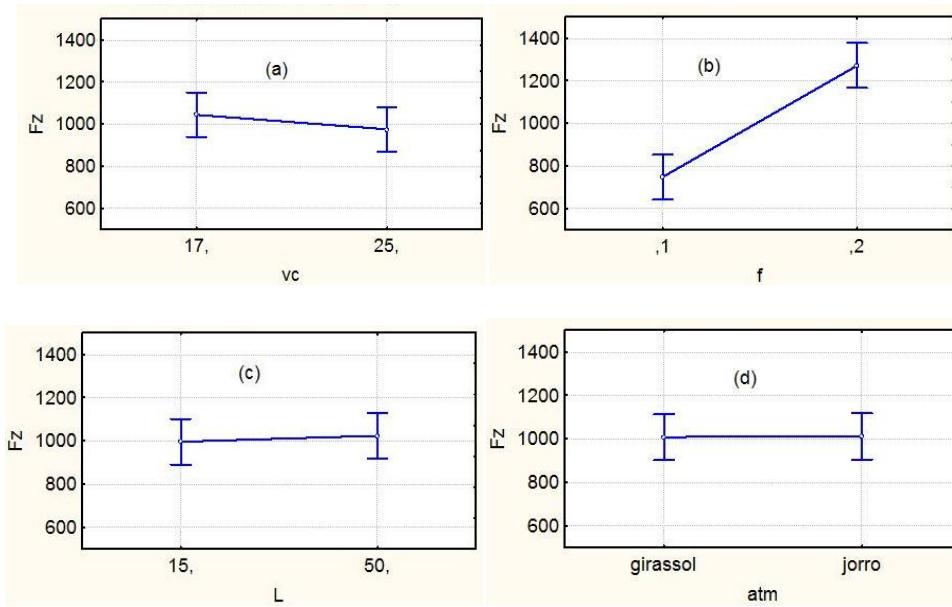


Figura 4.32 - Gráfico de tendências da força de avanço em função: (a) v_c , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Quando a velocidade de corte foi aumentada de 17 m/min para 25 m/min a força de avanço diminuiu em média 69 N (6,83%) Fig. 4.32 (a). O aumento do avanço de 0,1 mm/rot. para 0,2 mm/rot. aumentou a força de avanço em média 522 N (52,72%), Fig. 4.32

(b). O aumento do comprimento do furo de 15 mm para 50 mm teve em média um aumento discreto na força de avanço em 28 N (2,77%), Fig. 4.32 (c). Com aplicação de fluido em abundância (jorro) ao invés do óleo de girassol, houve um ligeiro aumento na força de avanço, em média de 3 N (0,29%), Fig. 4.32 (d) não sendo significativa quando observado o valor de p , mas com uma pequena tendência do óleo de girassol apresentar forças de avanço menores.

4.3 Análise do Momento (Mz)

As Figuras 4.33 e 4.34 mostram os gráficos de barra correspondente às médias e desvios padrão para o momento (Mz) dos testes 1 a 4 e dos testes 5 a 8, para cada fluido e a seco conforme as Tab. 16 e Tab. 17 do Apêndice.

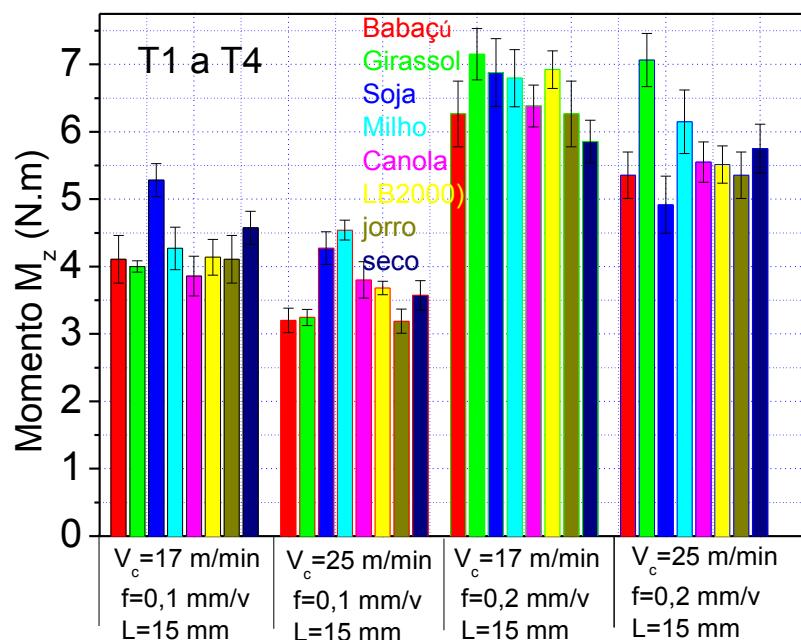


Figura 4.33 - Gráfico da média do momento Mz e desvio padrão, para cada óleo, jorro e a seco, nos testes T1 a T4 L = 1,5 x D, Q = 50 ml/h.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

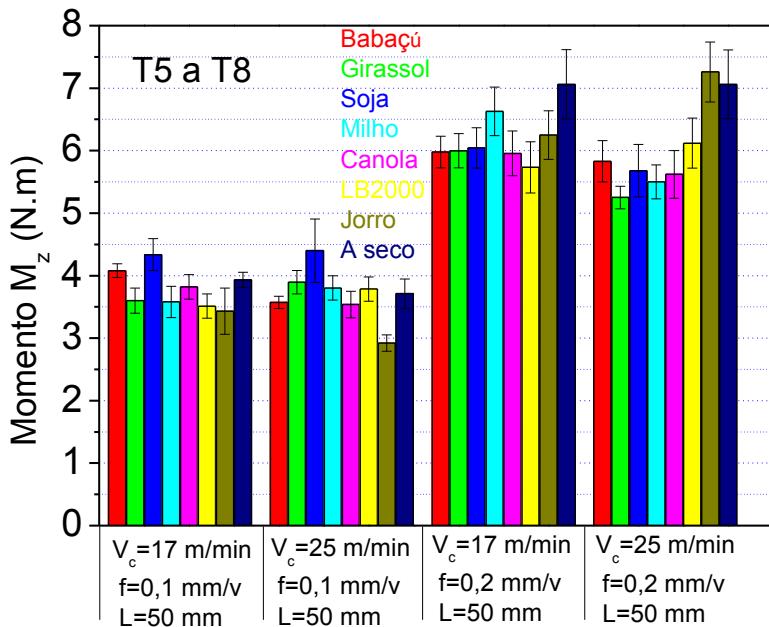


Figura 4.34 - Gráfico da média da força F_z e desvio padrão, para cada óleo, jorro e seco, nos testes 1- 4, $L = 1,5 \times D$, $Q = 50 \text{ ml/h}$.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Nesses gráficos pode-se observar a diferença significativa do momento M_z , quando o avanço passa de 0,1 mm/rot para 0,2 mm/rot. Observa-se também, em alguns casos, uma ligeira diminuição no torque com o aumento da velocidade de corte. O efeito do comprimento de corte, assim como dos fluidos não é evidente. Na maioria das situações, os óleos vegetais comestíveis aumentam o torque na furação, superando inclusive a situação a seco. Em outras situações, proporcionarão o menor torque, sendo comparada à aplicação com jorro, ou com o LB2000.

Para uma melhor confiabilidade nos resultados e uma análise mais minuciosa do processo, com a necessidade de comparar-se os dados pesquisados e a influência de cada variável, analisou-se estatisticamente se os parâmetros de entrada exercerão influência ou algum efeito sobre os parâmetros de saída, quando comparamos os óleos comestíveis e as aplicações existentes na furação acima citados.

A Tab. 4.11 mostra o resumo da ANOVA realizado pelo programa estatístico oringiPro8, para os testes 1 a 4, e comprimento de corte $L=15 \text{ mm}$, após ser observado nos gráficos de barra que não houve diferença significativa quando alteramos o comprimento do furo para $L = 50 \text{ mm}$. O fator A são as condições de corte e B são os óleos comestíveis, LB2000 e a condição a seco, conforme Tab. 18 do Apêndice.

Tabela 4.11 - Resumo da ANOVA para os testes de 1 a 4, L=15 mm para momento Mz.

	nGL	SQ	MQ	F	P
Fator A	3	119,99251	39,9975	392,85053	0
Fator B	7	7,46387	1,06627	10,47275	1,09088E-8
Interação	21	14,8353	0,70644	6,93859	8,34661E-10
Modelo	31	142,29168	4,59005	45,08294	0
Erro	64	6,51607	0,10181	--	--
Total	95	148,80775	--	--	--

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

A Tab. 4.11 pontua que, ao nível de 5%, a média da população do fator A, a média da população do fator B e as interações entre o fator A e o fator B são significativamente diferentes, ou seja: rejeita-se a hipótese de que as médias de tratamentos são iguais. Vide Tab. 18 do Apêndice gerado pelo programa.

A Tab. 4.12 mostra a comparação dos óleos pelo método de Tukey, para os testes de 1 a 4, L = 15 mm, para todas as aplicações consideradas significantes, conforme resultado da ANOVA da Tab. 18 do apêndice.

Tabela 4.12 - Comparaçao das diferenças das médias pelo método Tukey.

SIG = 1	Média 1	Média 2	Diferença	Melhor
Girassol x babaçu	5,34667	4,7275	0,61917	Babaçu
Soja x babaçú	5,33417	4,7275	0,60667	Babaçu
Milho x babaçú	5,46167	4,7275	0,73417	babaçu
Canola x girassol	4,84167	5,34667	-0,505	Canola
Canola x soja	4,84167	5,33417	-0,4925	Canola
Canola x milho	4,84167	5,46167	-0,62	Canola
LB2000 x girassol	4,89583	5,34667	-0,45083	LB2000
LB2000 x soja	4,89583	5,33417	-0,43833	LB2000
LB2000 x milho	4,89583	5,46167	-0,56583	LB2000
Jorro x girassol	4,73167	5,34667	-0,615	Jorro
Jorro x soja	4,73167	5,33417	-0,6025	Jorro
Jorro x milho	4,73167	5,46167	-0,73	Jorro
A seco x girassol	4,935	5,34667	-0,41167	A seco
A seco x milho	4,935	5,46167	-0,52667	A seco

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

A Tab. 4.12 mostra qual é o melhor óleo; quando se comparam dois a dois a diferença das médias dos momentos (M_z) obtidos. No entanto, o resultado desta tabela não confirma qual entre todos os óleos é o melhor, ou se um óleo é melhor para uma determinada condição e para outra não. Observa-se também nessa tabela que os melhores óleos são diferentes dos obtidos pela força de avanço. A Fig. 4.35 permite uma análise gráfica da comparação entre os fluidos.

Como o objetivo é saber qual óleo é melhor ou qual o comportamento dos óleos em relação aos momentos M_z é o maior responsável em reduzir os momentos, se foi o avanço, analisamos as condições V1F1, V2F1 e V1F2, V2 F2 através da Figura 4.32.

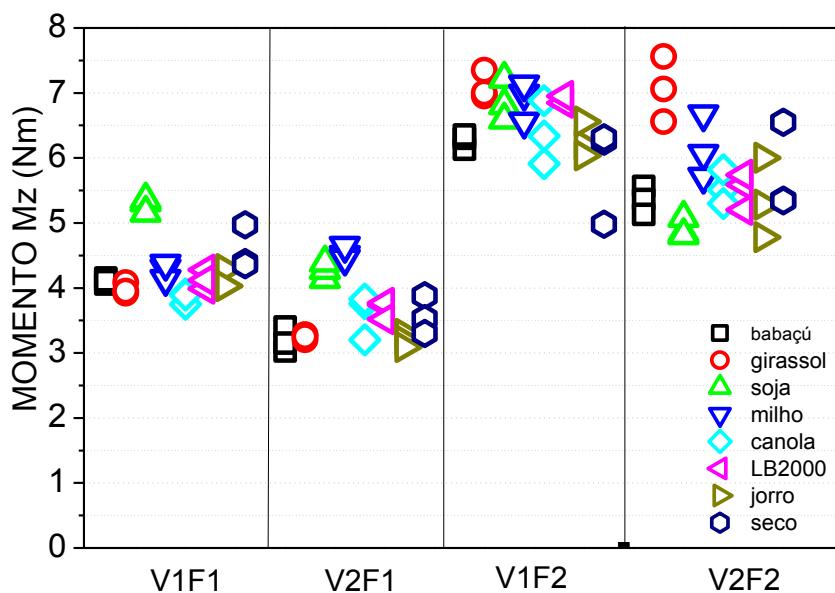


Figura 4.35 - Diagrama de dispersão do crescimento para os quatros tratamentos para cada óleo em relação aos momentos.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Com base no gráfico da Fig. 4.35 é possível observar que existe interação nos valores dos momentos obtidos para um mesmo óleo vegetal e outras formas de aplicações envolvidas. De maneira geral, não houve um único fluido de corte que apresentasse melhor desempenho em todas as condições investigadas. No entanto, fatores como condições de corte, e posição dos sensores do dinamômetro ainda permanecem como variáveis críticas na determinação dos mesmos e podem ter influenciado os resultados, mesmo sabendo-se que os momentos no centro não tiveram diferenças significativas dos obtidos fora do centro Tab. 38 do Apêndice, necessitando de estudos mais criteriosos para melhores esclarecimentos. O gráfico dos erros médios dos desvios Fig. 4.36, fornece mais algumas informações sobre os óleos.

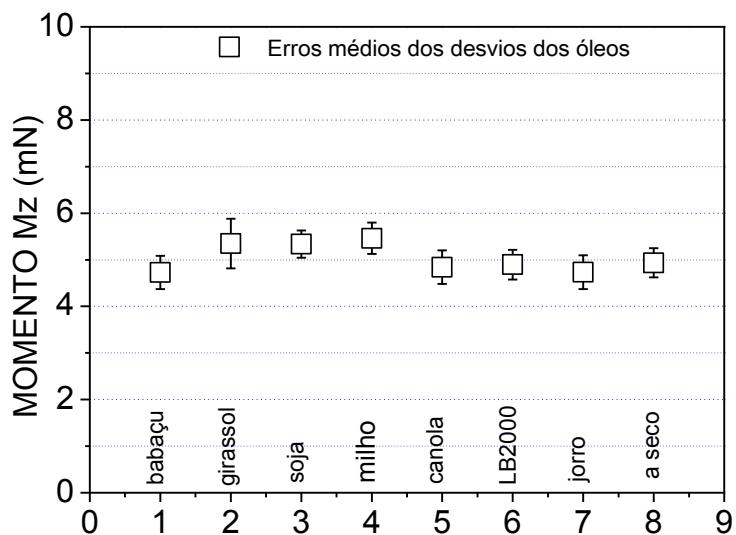


Figura 4.36 - Gráfico dos erros médios do momento Mz, em função dos óleos para os testes 1 - 4, $L = 1,5 \times D$, $Q = 50 \text{ ml/h}$.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Este gráfico mostra que, analisando-se os óleos independentemente das condições de corte, a média dos momentos e sua dispersão são pequenas, isto é, a variação em torno da média é pequena, evidenciando que as amostras são normais e os óleos comestíveis são aceitáveis como fluido de corte quando comparados com os métodos já existentes na furação. Para validar a ANOVA, analisam-se os resíduos padronizados. As estimativas de erros recebem o nome de resíduos e é o estudo dessas estimativas, ou seja, é a análise de resíduos que ajuda verificar se a análise de variância feita é aceitável Vieira (2006). A Fig. 4.34 mostra o gráfico correspondente à esta análise.

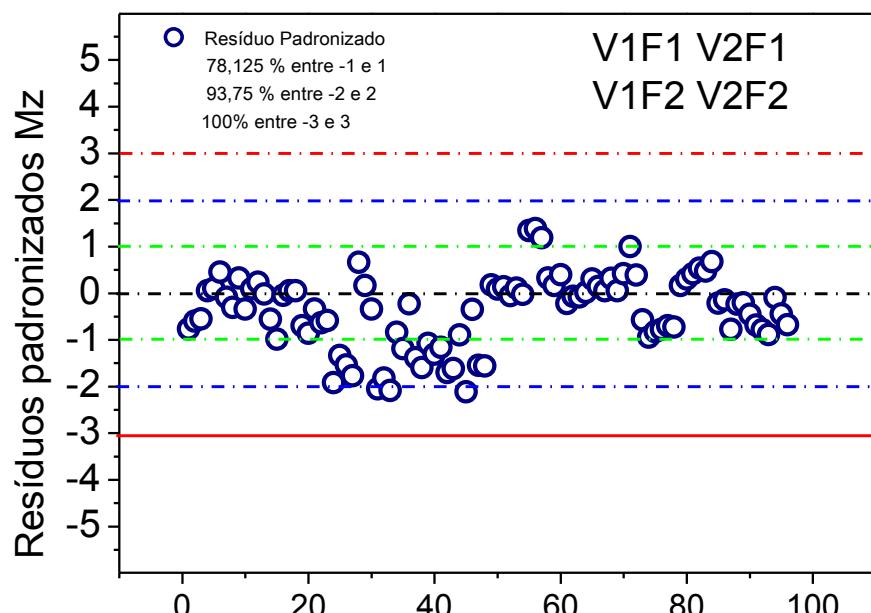


Figura 4.37. Gráfico dos resíduos padronizados (estimativa de erros), para os momentos (Mz) dos testes T1 a T4, $L = 15 \text{ mm}$.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

A Fig. 4.37 mostra que 78,125% dos valores de uma distribuição normal encontram-se dentro da faixa de um desvio padrão, tanto para mais quanto para menos em relação à média 93,75% dos valores de uma distribuição normal, então encontram-se dentro da faixa de dois desvios padrão, tanto para mais quanto para menos em relação a média 100% dos valores de uma distribuição normal encontram-se dentro da faixa de três desvios padrão, tanto para mais quanto para menos, em relação à média. Então, poderemos concluir que não houve pontos discrepantes, valor muito maior ou muito menor do que o valor esperado ou valores fora do intervalo -3 e +3; logo, a análise de variância será aceitável.

Para uma análise mais detalhada do comportamento dos óleos e as condições de corte e em virtude da grande quantidade de óleos comestíveis testados (no total cinco e mais três já utilizados na furação), analisaram-se os mesmos dois óleos (canola e girassol) para momento (M_z) e foram compados com as aplicações já existentes (a seco, LB2000 e jorro).

4.3.1 Análise do Momento M_z : girassol x a seco

As Figs 4.38 e 4.39 mostram os gráficos característicos do torque (M_z) em função do tempo (s), na furação do aço ABNT 1045, nos comprimentos $L = 1,5 \times D$ e $L = 5 \times D$ para os testes (T1 a T8) do óleo vegetal de girassol na forma MQF com vazão de 50 ml/h e as Fig. 4.40 e 4.41 mostram o gráfico característico dos momentos da furação a seco dos testes (T1 a T8).

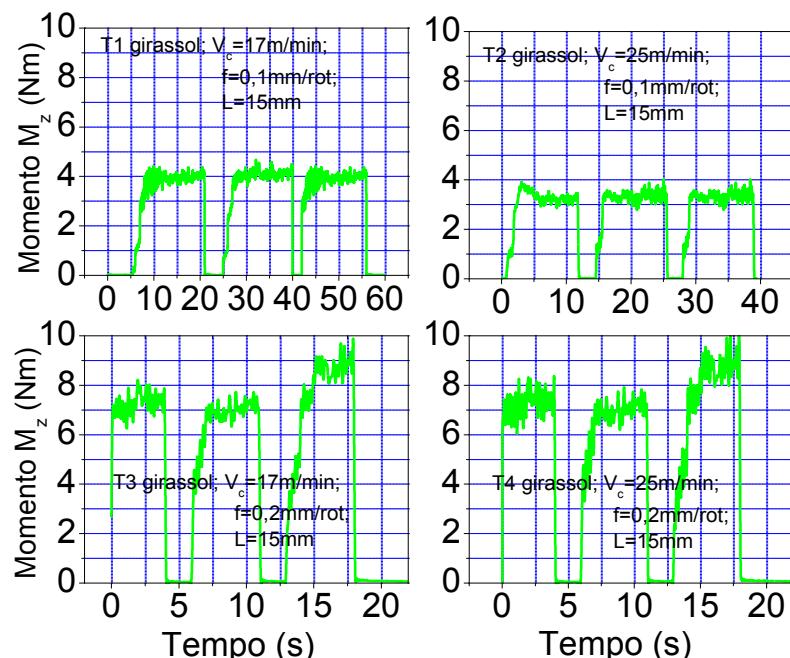


Figura 4.38 - Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições T1 a T4 na furação $L = 1,5 \times D$, girassol MQF, $Q = 50$ ml/h.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

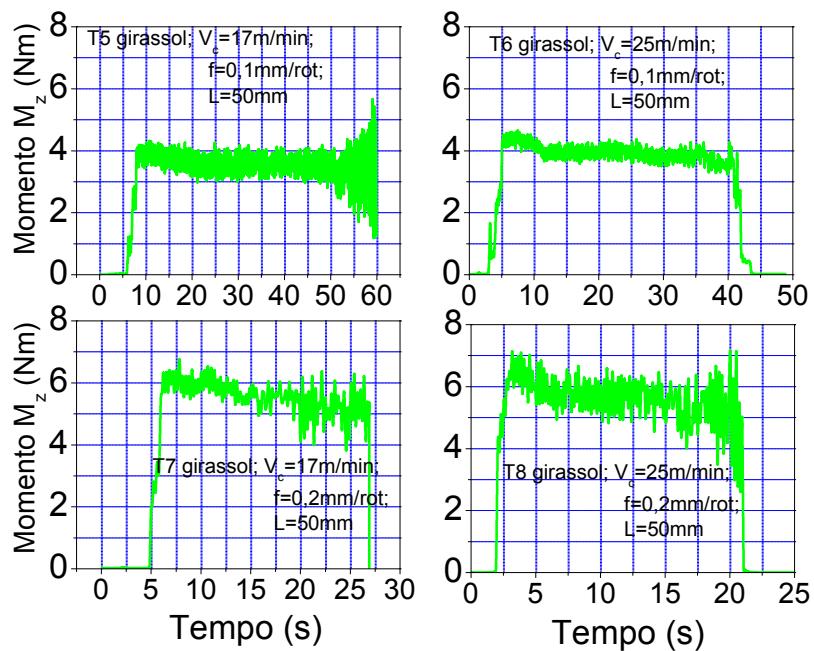


Figura 4.39 - Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições T5 a T8 na furação, $L = 5 \times D$, girassol MQF, $Q = 50 \text{ ml/h}$.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

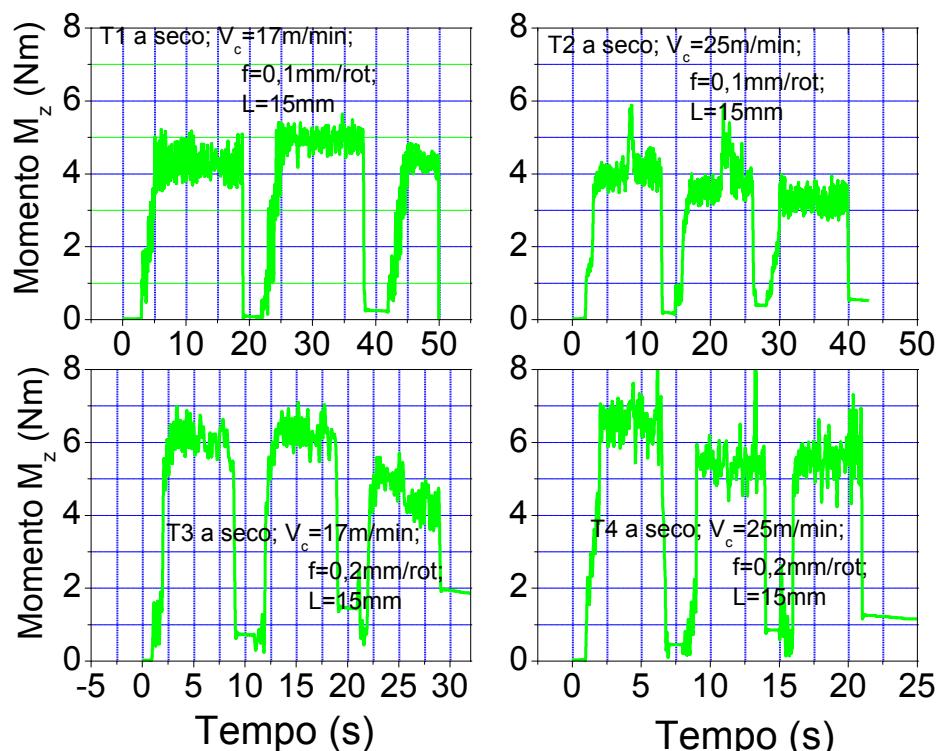


Figura 4.40 - Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições T1 a T4 na furação $L = 1,5 \times D$, a seco.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

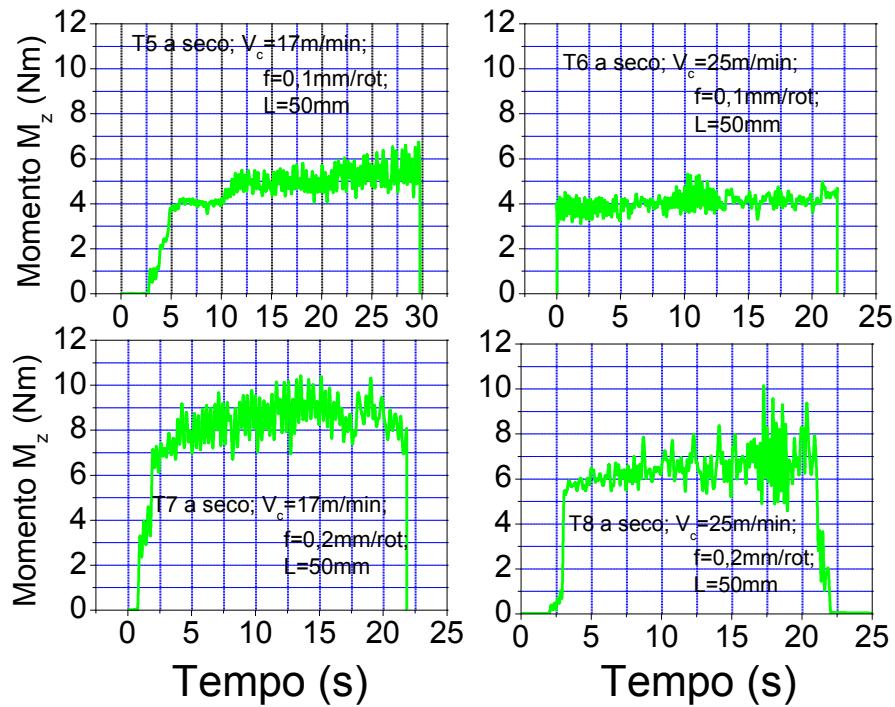


Figura 4.41 - Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições T5 a T8 na furação, $L = 5 \times D$, a seco.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Com fundamento nesses gráficos, pode-se inicialmente observar a influência dos parâmetros de entrada, envolvidos no processo, sendo mais significativa a do avanço (f), assim como nos gráficos da força de avanço, o efeito do comprimento de corte (L) e o efeito do fluido precisam ser analisados estatisticamente para uma melhor avaliação.

A Fig. 4.42 mostra o gráfico de barras correspondente às médias e desvios padrão dos momentos (M_z) dos testes (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8, conforme Tab. 19 e Tab. 20 do Apêndice, para efeito de comparação entre o uso de óleo comestível de girassol e a furação a seco.

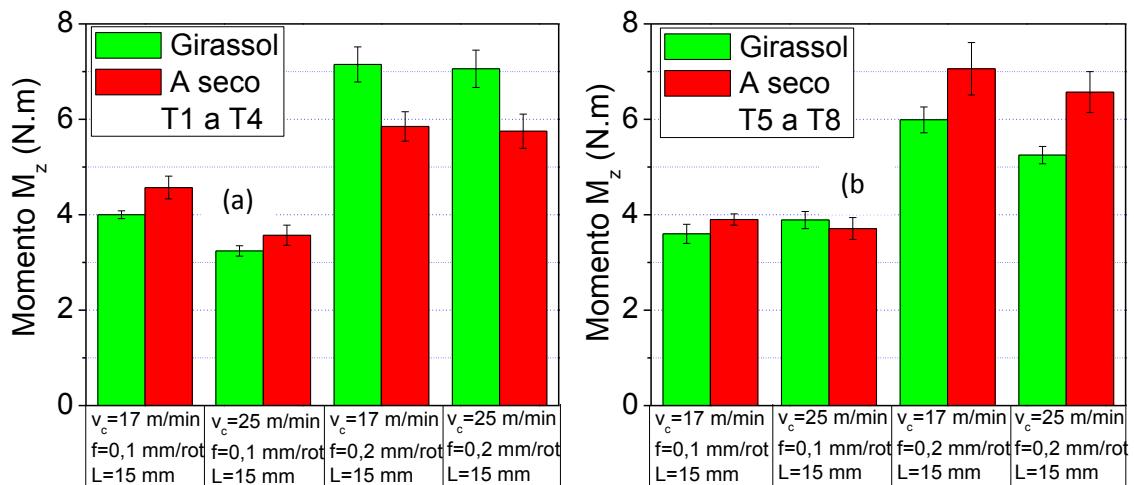


Figura 4.42 - Gráfico da média e desvio padrão da força de avanço F_z em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 girassol MQF, $Q=50 \text{ ml/h}$ e a seco.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Nas Figs. 4.42 (a) e (b) é também destacado que o momento M_z aumenta com o aumento do avanço (f) como nos outros casos apresentados para força de avanço F_z . Com o aumento da velocidade de corte é também observado uma pequena redução nos momentos, considerando o mesmo fluido. A aplicação do óleo comestível de girassol na forma de mínima quantidade de fluido (MQF), quando comparadas na mesma condição com a furação a seco, apresentou na maioria das condições menores momentos M_z , o que pode ser confirmado pela análise estatística, estando os valores médios dos momentos em média, em torno de 4 N.m para avanços de 0,1 mm/rot e aumentando em torno de 6 N.m para avanços de 0,2 mm/rot.

4.3.2 Análise estatística dos momentos M_z : girassol x a seco

A Tab. 4.13 apresenta a análise ANOVA para o momento M_z do óleo comestível de girassol na forma MQF e a furação a seco através do sumário dos principais efeitos médios das variáveis de entrada. A Tab. 24 do Apêndice apresenta o resultado da matriz de planejamento.

Tabela 4.13- Principais efeitos médios das variáveis de entrada girassol x a seco

Gir x sec	Efeito	P
Média	5,07	0,000001
(1) V_c 17 - 25	-0,38	0,341633
(2) f 0,1 - 0,2	2,52	0,000987
(3) L 15 - 50	-0,52	0,694619
(4) Atm (girassol - seco)	0,10	0,795895

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

A Tab. 4.13 mostra os principais efeitos médios dos parâmetros de entrada onde se destacam a influência significativa do avanço (f). Ficou comprovada pelo índice “p” que apenas a variável (f) foi significativa no processo para uma confiabilidade de 95%. Análises de tendências para os efeitos médios poderão ser feitas para essas variáveis, como ilustrado nos gráficos da Figura 4.43 (a), (b), (c) e (d).

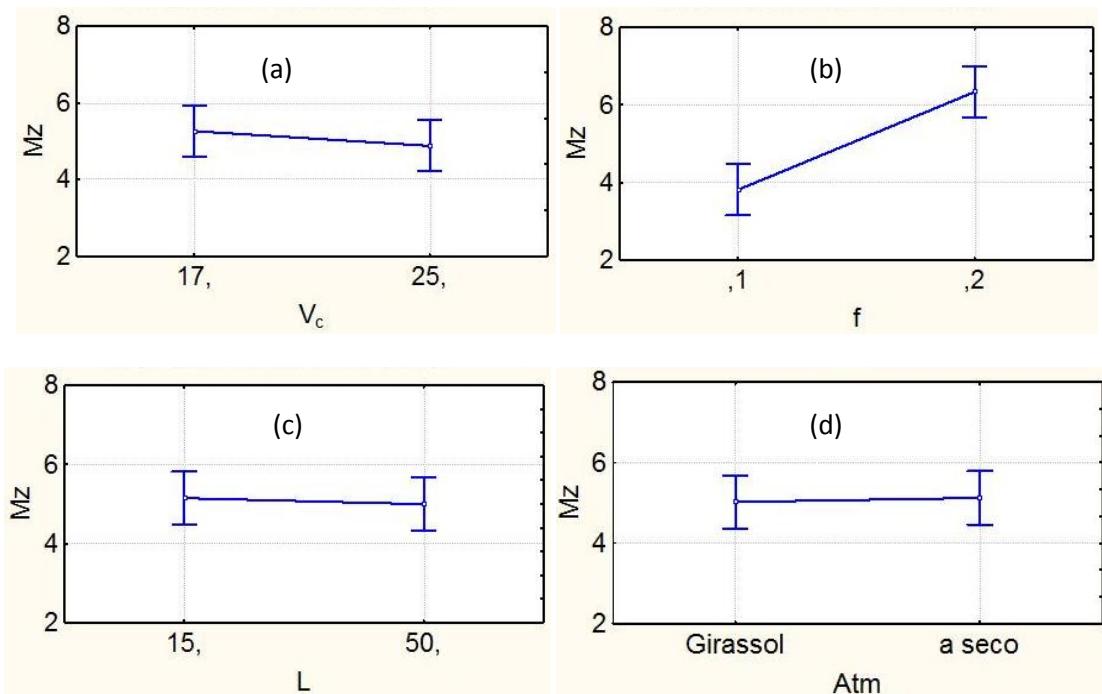


Figura 4.43 - Gráfico de tendências do momento M_z : (a) v_c , (b) f , (c) L , (d) atmosfera.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Quando a velocidade de corte foi aumentada de 17 m/min para 25 m/min o momento M_z diminuiu em média 0,385 N.m (7,49%), Fig. 4.43 (a). O aumento do avanço de 0,1 mm/rot. para 0,2 mm/rot. aumentou o momento em média 2,525 N.m (49,7%), Fig. 4.43 (b) sendo significativo no processo. O aumento do comprimento do furo de 15 mm para 50 mm teve em média uma redução discreta no momento em 0,525 N.m (10,25%), Fig. 4.43 (c), no entanto, não é significativo no processo. Com o uso da furação com óleo comestível de girassol aplicado na forma MQF, ao invés da furação a seco observa-se também uma pequena diminuição no momento, em média de 0,1 N.m (1,97%) Fig. 4.43 (d), não sendo também significativa no processo quando se observa o valor de p , mas com uma tendência do óleo de girassol apresentar menores momentos em relação à usinagem sem fluido.

4.3.3 Análise do momento M_z : girassol x LB2000

As Figs. 4.44 e 4.45 mostram os gráficos característicos do Momento (M_z) em função do tempo (s), para os testes (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 na furação do aço ABNT 1045, nos comprimentos $L = 1,5 \times D$ e $L = 5 \times D$ do óleo vegetal comercial LB2000 na forma MQF com vazão de 50 ml/h para ser comparado com o já apresentado óleo vegetal comestível de girassol também aplicado na forma MQF.

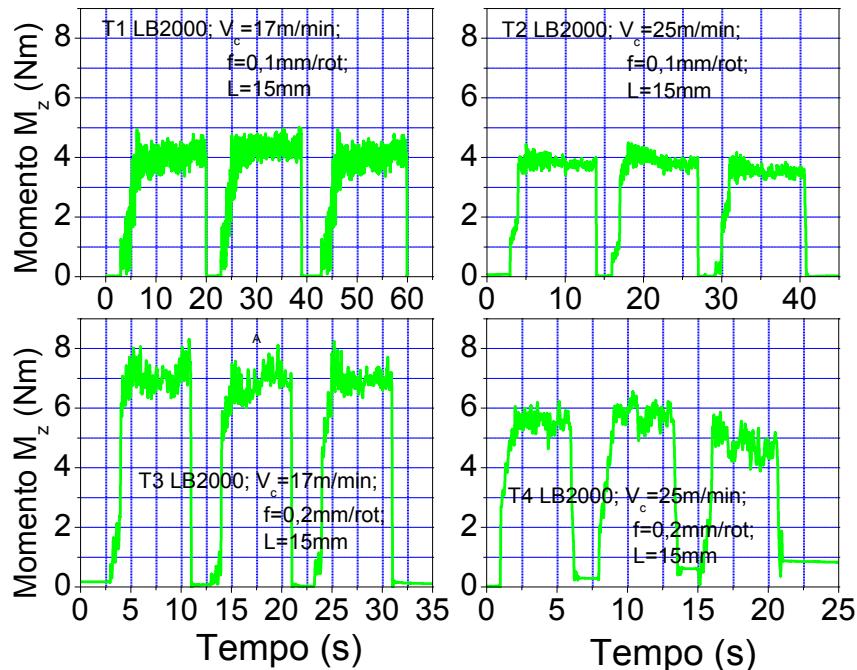


Figura 4.44 - Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições t1 a t4 na furação $l=1,5 \times d$ do óleo comercial lb2000 aplicado na forma mqf, $q = 50 \text{ ml/h}$.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

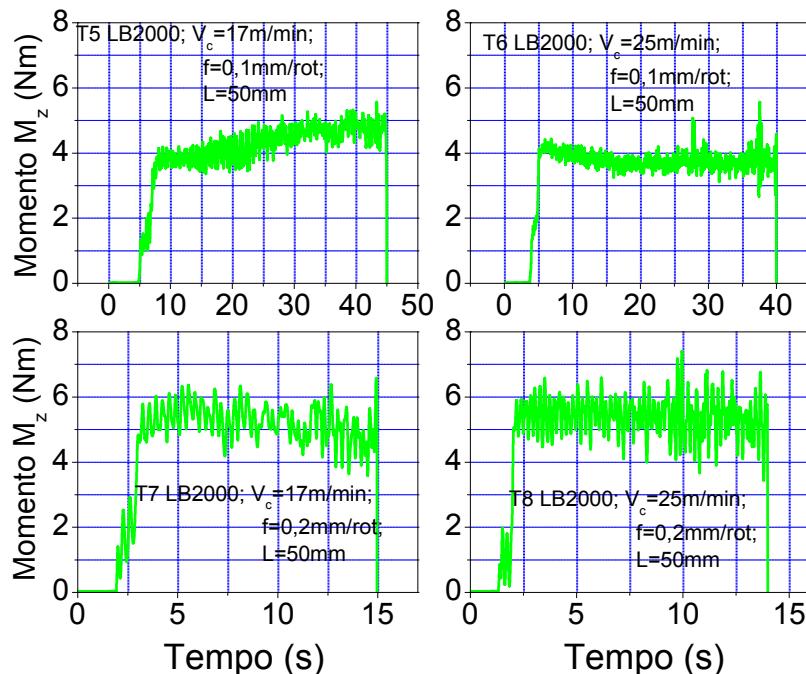


Figura 4.45 - Gráficos do momento M_z em função do tempo, das condições T5 a T8 na furação, $L = 5 \times D$, do óleo comercial LB2000, aplicado na forma MQF, $Q = 50 \text{ ml/h}$.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Por esses gráficos podemos inicialmente observar a influência dos parâmetros de entrada, envolvidos no processo, sendo mais significativa a do avanço (f) como nos casos anteriores, o momento tenderá a sofrer uma ligeira redução com o aumento da velocidade de corte. A Fig. 4.46 mostra o gráfico de barras correspondente às médias e desvios padrão dos momentos (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8, Tabs. 19 e 21 do Apêndice, para

efeito de comparação entre o uso de fluido comestível de girassol e o fluido comercial LB2000.

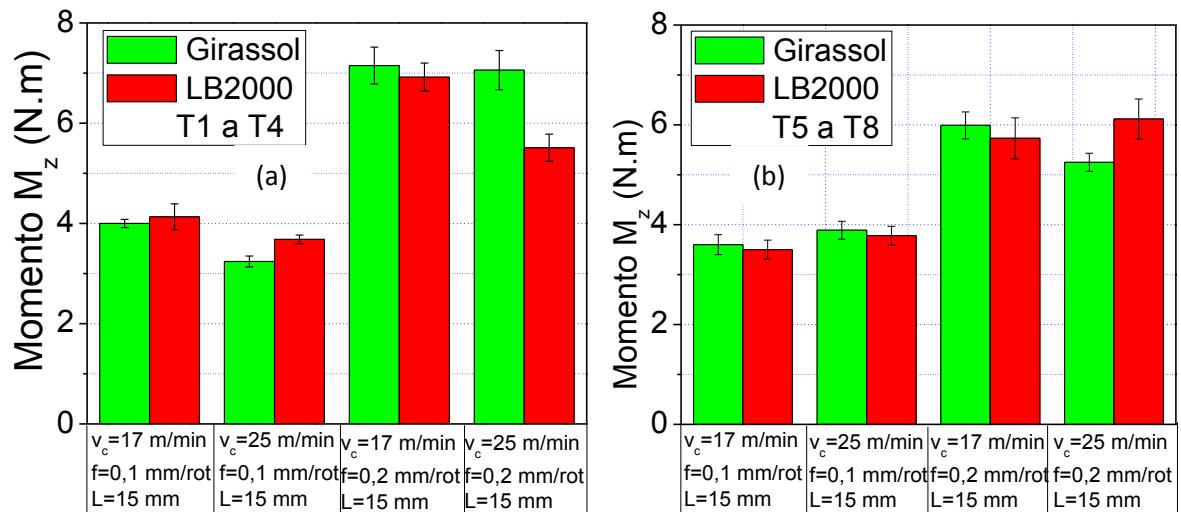


Figura 4.46 - Gráfico da média e desvio padrão do momento M_z em função dos testes, (a) T1 a T4 e (b) T5 a T8 girassol e LB2000, MQF a $Q=50$ ml/h.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2013).

Nas Figs. 4.46 (a) e (b) é também destacado que o momento aumentará com o aumento do avanço como nos outros casos apresentados. Com o aumento da velocidade de corte será também observada uma pequena redução nos momentos, considerando-se o mesmo fluido. A aplicação do óleo comestível de girassol na forma de mínima quantidade de fluido (MQF) quando comparadas na mesma condição com o óleo comercial LB2000 apresentou na maioria das condições maiores momentos, o que pode ser confirmado pela análise estatística, estando os valores dos momentos média em torno de 4 N.m para avanços de 0,1 mm/rot e aumentando em torno de 6 N.m para avanços de 0,2 mm/rot.

4.3.4 Análise estatística dos momentos M_z : girassol x LB2000

A Tab. 4.14 apresenta a análise ANOVA (statSoft 7.0) para o momento (M_z) do óleo de girassol e LB2000 através do sumário dos principais efeitos médios das variáveis de entrada e a Tab. 25 do Apêndice mostra o resultado da matriz de planejamento para esse caso.