

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ASPECTOS TECNOLÓGICOS DA USINAGEM A SECO E COM MÍNIMA
QUANTIDADE DE FLUIDO DE CORTE NA FURAÇÃO COM BROCA HELICOIDAL

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

PABLO RICARDO AMARANTE DE CASTRO

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2001

ASPECTOS TECNOLÓGICOS DA USINAGEM A SECO E COM MÍNIMA
QUANTIDADE DE FLUIDO DE CORTE NA FURAÇÃO COM BROCA HELICOIDAL

PABLO RICARDO AMARANTE DE CASTRO

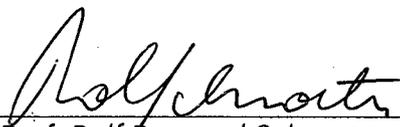
ESSA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

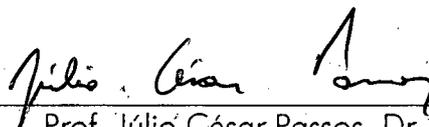
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO FABRICAÇÃO E
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.
Orientador



Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.
Co-orientador



Prof. Júlio César Passos, Dr.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA



Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.



Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph. D.



Rodrigo Lima Stoeterau, Dr. Eng.

*"... aqui vim para aprender convosco de uns
e outros, de todos, pois de que me serviria a
terra, para que se fizeram o mar e os
caminhos, senão para ir olhando e
aprendendo de todos os seres um pouco?"*

Pablo Neruda (1904-1973)

Aos meus pais Ricardo e Ana, e a minha irmã Jô.

A minha esposa Andréa.

AGRADECIMENTOS

Ao grande professor e mentor Dr.-Ing. **Walter Lindolfo Weingaertner** pela orientação e exemplo de sabedoria, pela confiança e incentivo durante toda a pesquisa.

Ao excelente professor Dr. Eng. **Rolf Bertrand Schroeter** pela orientação, pelo exemplo de profissionalismo, pelo apoio, pelas correções minuciosas e, sobretudo, pela valiosa amizade nos momentos difíceis.

Ao amigo e professor MSc. **Cleiton Rodrigues Teixeira**, por me abrir os olhos permitindo enxergar as coisas de uma maneira diferente, pelas incansáveis conversas, e principalmente pelo estilo "Felipão" de coordenar o grupo DUECO.

Ao xará e grande irmão de DUECO, MSc. **Pablo Deivid Valle**, sem o qual eu não teria ingressado no LMP e, além disso, por sua colaboração e incentivo desde o início.

Ao amigo e companheiro de DUECO, **Walmir Markus**, por sua amizade e ajuda no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao *brother* Dr.-Ing. **Joel Martins Crichigno Filho**, pelas inúmeras discussões, sugestões e ajuda, como também pelos momentos de descontração.

Aos amigos do LMP, MSc. **Milton "Miltinho" Pereira** e Dr. Eng. **Rodrigo "Guigo" Lima Stoeterau** pelas inúmeras revisões deste trabalho.

Aos amigos e futuros engenheiros **Rogério Tristoni** e **Adriano Boaron** pela ajuda e companheirismo incondicionais demonstrados nos momentos mais importantes.

Às empresas **BARDAHL**, **I. TERSTEGEN**, **GERDAU** e **TITEX**, pelo fornecimento dos insumos necessário para execução deste trabalho.

À **CAPES**, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Dr. Eng. **André de Souza**, ao engenheiro **Maurício** e ao técnico **Sérgio** do **LABMETRO** no auxílio durante uma etapa fundamental deste trabalho.

Aos técnicos, laboratórios e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, pela disponibilidade de equipamentos e fundamental contribuição na realização desta pesquisa, em especial ao Sr. **Hélio Irineu José** e ao engenheiro **Paulo Magalhães**.

E, finalmente, meus sinceros agradecimentos a **TODOS** os integrantes do **LMP** pela cooperação prestada nas mais diversas situações.

RESUMO

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar a influência da minimização e eliminação do fluido de corte no comportamento dos esforços de usinagem, do desgaste de flanco da ferramenta e da qualidade dos furos obtidos na furação com brocas helicoidais. Além disso, de forma complementar, visa avaliar o desempenho do revestimento das ferramentas nestas condições de trabalho em relação ao desgaste. Para tal, usinou-se com quatro condições distintas de refrigeração e lubrificação, sendo estas a usinagem a seco, a usinagem com emulsão e a usinagem com mínimas quantidades de fluido de corte (MQFC) de origem vegetal e mineral. Foram ensaiadas brocas helicoidais DIN338 de aço-rápido com e sem revestimento e de metal-duro classe P40 revestidas. Os revestimentos das brocas de aço-rápido foram o nitreto de titânio (TiN), nitreto de titânio e bissulfeto de molibdênio (TiN+MoS₂) e nitreto de titânio e alumínio (TiAlN). No caso das brocas de metal-duro, foram avaliados os revestimentos de nitreto de titânio (TiN) e nitreto de titânio e alumínio (TiAlN). Como material usinado utilizaram-se corpos de prova de aço ABNT1040. Os resultados obtidos mostraram que a usinagem com emulsão, que é um dos produtos lubri-refrigerantes mais utilizados na indústria, nem sempre é benéfica ao processo. Pelo contrário, em certos casos acelera o desgaste da ferramenta. A usinagem com MQFC mostrou ser uma alternativa viável para substituir esta forma de lubrificação e refrigeração. A usinagem a seco por sua vez, mostrou ser muito severa devido às altas temperaturas geradas durante a furação na maioria dos casos, sendo necessária a reavaliação dos parâmetros de processo para se usinar nesta condição. Em relação ao tempo de vida das ferramentas, as de aço-rápido revestidas atingiram maiores valores principalmente com TiN. As brocas de metal-duro revestidas com TiN, em termos de desgaste de flanco, tiveram melhor desempenho na usinagem a seco e com MQFC. Já com a ferramenta revestida com TiAlN, os melhores resultados obtidos foram na usinagem com emulsão.

ABSTRACT

This work has as main objective to evaluate the cutting fluid minimization and elimination influence in the machining forces, in the tool flank wear and in the hole quality behavior obtained in the drilling operation with twist drill. Besides that, in a complementary way, it was aimed at evaluating the coating performance under these working conditions related to tool wear. In order to do that, machining was carried out under four different refrigeration and lubrication conditions, which were, dry machining, machining with emulsion and machining with minimal amounts (MQFC) of vegetable and mineral cutting fluids. The coated and uncoated DIN338 high speed steel as well as coated carbide drill P40 class was investigated. The high-speed steel drills were coated with titanium nitride (TiN), titanium nitride and molybdenum disulfide (TiN+MoS₂) and titanium nitride and aluminum (TiAlN). In case of carbide drills, they were titanium nitride (TiN) and titanium nitride and aluminum (TiAlN) coated. The ABNT1040 steel was used as machined workpiece. The obtained results showed that machining with emulsion, which is one of the most used products in the industry, is not always beneficial to the process. On the other hand, in certain cases it accelerates tool wear. MQFC machining showed to be a viable alternative to substitute this lubrication and refrigeration form. Dry machining showed to be very severe in most cases due high temperatures generated during drilling, being necessary a re-evaluation of the process parameters to machine in this condition. With regard to the tool life, the coated high-speed steel twist drill reached better values mainly with TiN. The TiN coated carbide drills, based on the flank wear had better performance in dry and MQFC machining. For the TiAlN coated tools, the best results were obtained when machining with emulsion.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS	xxiv
LISTA DE REDUÇÕES	xxvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 ESTADO DA ARTE	4
2.1 O Processo de Furação	4
2.2 Tipos de Brocas	8
2.3 Furação com Brocas Helicoidais.....	11
2.3.1 Nomenclatura das Brocas Helicoidais.....	11
2.3.2 Geometria das Brocas Helicoidais	13
2.3.3 Classificação das Brocas Helicoidais	14
2.4 Materiais para Ferramentas de Furação.....	15
2.4.1 Aço-rápido.....	17
2.4.2 Metal-duro	19
2.4.2.1 O Metal-duro na Furação.....	20
2.4.2.2 O Metal-duro com Micro-grãos de Carbonetos	21
2.4.3 Cermet.....	23
2.4.4 Cerâmicas.....	23
2.4.5 Materiais Super-duros	23
2.5 Revestimentos de Ferramentas de Corte	24
2.5.1 Processos de Revestimento	25
2.5.2 Principais Tipos de Revestimento.....	28
2.5.3 Novas Tendências para Revestimento	31
2.6 Forças na Furação.....	31

2.7 Fases da Furação	35
2.8 Desgaste de Ferramentas	36
2.8.1 Mecanismos de Desgaste	36
2.8.2 Formas de Desgaste	39
2.8.3 Desgaste em Brocas Helicoidais	44
2.9 Critérios de Fim de Vida	47
2.10 Qualidade do Processo de Furação.....	49
2.10.1 Erros Comuns na Geometria do Furo	50
2.10.2 Qualidade Superficial na Furação	51
2.11 Meios Lubri-refrigerantes.....	52
2.11.1 Estratégias de Aplicação dos Meios Lubri-refrigerantes	53
2.11.2 Critérios de Seleção.....	55
2.11.3 Tipos de Meios Lubri-refrigerantes	55
2.11.4 Problemas Relacionados com o Uso dos Meios Lubri-refrigerantes.....	56
2.12 Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte (MQFC).....	59
2.12.1 Técnica de Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte	60
2.12.2 Limitações da Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte ..	62
2.12.3 Furação a Seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte	63
3. MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.1 Corpo de Prova	65
3.1.1 Material do Corpo de Prova.....	66
3.2 Ferramentas de Corte	67
3.2.1 Identificação e Codificação das Ferramentas	67
3.2.2 Ferramentas de Corte Ensaçadas	67
3.2.3 Parâmetros de Usinagem	68
3.2.4 Estratégia de Usinagem.....	69
3.3 Meios Lubri-refrigerantes	69
3.3.1 Formas de Aplicação dos Meios Lubri-refrigerantes	69
3.3.2 Equipamento para aplicação do óleo vegetal e mineral em MQFC.....	72
3.4 Máquina-ferramenta	72
3.5 Controle da Aquisição dos Dados de Força e Desgaste	73

3.6 Sistema de Aquisição da Força Axial e Momento Torçor	74
3.6.1 Equipamentos.....	74
3.6.2 Metodologia de Aquisição	75
3.6.3 Metodologia de Avaliação	75
3.7 Sistema para Avaliação do Desgaste	77
3.7.1 Equipamentos.....	78
3.7.2 Metodologia de Aquisição	79
3.7.3 Metodologia de Avaliação	79
3.8 Sistema para Avaliação da Qualidade dos Furos	80
3.8.1 Equipamentos.....	80
3.8.2 Metodologia de Aquisição	81
3.8.3 Metodologia de Avaliação	83
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	85
4.1 Ferramentas de Aço-rápido sem Revestimento – A1211 – (Lote A)	86
4.1.1 Desgaste de Flanco Máximo	87
4.1.2 Força Axial Média.....	89
4.1.3 Momento Torçor Médio	91
4.1.4 Rugosidades R_a e R_p	92
4.1.5 Erro de Circularidade.....	94
4.1.6 Erro de Cilindricidade	95
4.1.7 Diâmetro Médio do Furo.....	96
4.1.8 Considerações sobre os Resultados	97
4.2 Ferramentas de Aço-rápido com Revestimento de Nitreto de Titânio – A1211TiN – Fabricante B (Lote B)	98
4.2.1 Desgaste de Flanco Máximo	99
4.2.2 Força Axial Média.....	101
4.2.3 Momento Torçor Médio	102
4.2.4 Rugosidades R_a e R_p	103
4.2.5 Erro de Circularidade.....	105
4.2.6 Erro de Cilindricidade	106
4.2.7 Diâmetro Médio do Furo.....	107

4.2.8 Considerações sobre os Resultados	108
4.3 Ferramentas de Aço-rápido com Revestimento de Nitreto de Titânio – 651TiN – Fabricante A (Lote D)	108
4.3.1 Desgaste de Flanco Máximo	110
4.3.2 Força Axial Média.....	111
4.3.3 Momento Torçor Médio	112
4.3.4 Rugosidades R_a e R_t	113
4.3.5 Erro de Circularidade.....	114
4.3.6 Erro de Cilindricidade	115
4.3.7 Diâmetro Médio do Furo.....	116
4.3.8 Considerações sobre os Resultados	116
4.4 Ferramentas de Aço-rápido com Revestimento Nitreto de Titânio e Bissulfeto de Molibdênio – 651TiN+MoS ₂ – (lote E).....	117
4.4.1 Desgaste de Flanco Máximo	119
4.4.2 Força Axial Média.....	120
4.4.3 Momento Torçor Médio	121
4.4.4 Rugosidades R_a e R_t	122
4.4.5 Erro de Circularidade.....	124
4.4.6 Erro de Cilindricidade	125
4.4.7 Diâmetro Médio do Furo.....	126
4.4.8 Considerações sobre os Resultados	126
4.5 Ferramentas de Aço-rápido com Revestimento Nitreto de Titânio e Alumínio – A1246TFL – (lote C);	127
4.5.1 Desgaste de Flanco Máximo	130
4.5.2 Força Axial Média.....	131
4.5.3 Momento Torçor Médio	132
4.5.4 Rugosidades R_a e R_t	133
4.5.5 Erro de Circularidade.....	134
4.5.6 Erro de Cilindricidade	135
4.5.7 Diâmetro Médio do Furo.....	136
4.5.8 Considerações sobre os Resultados	137

4.6 Ferramentas de Metal-duro com Revestimento de Nitreto de Titânio – A3265TiN	
– (lote F).....	137
4.6.1 Desgaste de Flanco Máximo	138
4.6.2 Força Axial Média.....	140
4.6.3 Momento Torçor Médio	141
4.6.4 Rugosidades R_a e R_t	142
4.6.5 Erro de Circularidade.....	144
4.6.6 Erro de Cilindricidade	145
4.6.7 Diâmetro Médio do Furo.....	146
4.6.8 Considerações sobre os Resultados	146
4.7 Ferramentas de Metal-duro com Revestimento de Nitreto de Titânio e Alumínio – A3265TiAlN – (lote G).....	147
4.7.1 Desgaste de Flanco Máximo	148
4.7.2 Força Axial Média.....	149
4.7.3 Momento Torçor Médio	150
4.7.4 Rugosidades R_a e R_t	151
4.7.5 Erro de Circularidade.....	153
4.7.6 Erro de Cilindricidade	154
4.7.7 Diâmetro Médio do Furo.....	155
4.7.8 Considerações sobre os Resultados	156
4.8 Análise em Função da Condição de Lubrificação e Refrigeração do Processo	156
4.8.1 Ferramentas de Aço-rápido.....	156
4.8.2 Ferramentas de Metal-duro	159
4.8.3 Considerações Finais	160
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	162
5.1 Conclusões	162
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	163
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165

7 ANEXOS	174
A Dados do Material dos Corpos de Prova	174
B Dados das Geometrias, dos Materiais e Revestimentos das Ferramentas do Fabricante A	174
C Dados das Geometrias, dos Materiais e Revestimentos das Ferramentas do Fabricante B	175
D Dados dos Produtos Lubri-refrigerantes.....	176
E Dados do Atomizador Pneumático para Aplicação em QMFC	177
F Dados da Máquina-ferramenta	177
G Formulário de Acompanhamento dos Ensaios	178
H Dados da Plataforma Piezelétrica e dos Amplificadores	178
I Dados da Câmera CCD.....	179
J Dados da Máquina de Medir por Coordenadas.....	180

LISTA DE FIGURAS

2. ESTADO DA ARTE

FIGURA 1 – Furadeira manual neolítica	4
FIGURA 2 – Participação da furação com brocas helicoidais em comparação com outras operações de usinagem	5
FIGURA 3 – Tempo empregado na furação entre outras operações usinagem.....	5
FIGURA 4 – Subdivisão do processo de furação	7
FIGURA 5 – Tipos de brocas	9
FIGURA 6 – Nomenclatura da broca helicoidal	12
FIGURA 7 – Geometria da broca helicoidal	13
FIGURA 8 – Materiais para ferramentas de corte	16
FIGURA 9 – Metal-duro com fases α e β	19
FIGURA 10 – Metal-duro com fases α , β e γ	20
FIGURA 11 – Revestimento simples, duplo e múltiplo respectivamente	25
FIGURA 12 – Processo CVD	26
FIGURA 13 – Processo PVD	27

FIGURA 14 – Forças atuantes no gume principal	32
FIGURA 15 – Mecanismos de desgaste	37
FIGURA 16 – Difusão	38
FIGURA 17 – Formas de desgaste	40
FIGURA 18 – Formação de fissuras transversais e longitudinais	41
FIGURA 19 – Deformação plástica no gume de uma ferramenta de aço-rápido para torneamento	42
FIGURA 20 – Formas de desgaste e grandezas a serem medidas na cunha da ferramenta	43
FIGURA 21 – Desgaste na broca helicoidal	45
FIGURA 22 – Vários tipos de desgaste em brocas	46
FIGURA 23 – Erros geométricos e dimensionais usuais na furação	50
FIGURA 24 – Sistema atomizador para aplicação de fluido de corte em névoa	54
FIGURA 25 – Consumo global por região dos produtos lubri-refrigerantes	59
FIGURA 26 – Consumo global por tipo dos produtos lubri-refrigerantes	60
FIGURA 27 - Furação com quantidade mínima de fluido de corte (óleo mineral)	62

3. MATERIAIS E MÉTODOS

FIGURA 28 – Corpo de prova - dimensões em milímetros	66
FIGURA 29 – Furação com a utilização de emulsão	70
FIGURA 30 – Furação com MQFC utilizando óleo mineral	70
FIGURA 31 – Furação com a MQFC utilizando óleo vegetal	71
FIGURA 32 – Furação a seco	71
FIGURA 33 – Atomizador pneumático para a aplicação de fluido de corte em mínima quantidade	72
FIGURA 34 – Fresadora Polaris F400	73
FIGURA 35 – Sistema de aquisição de sinais	74
FIGURA 36 – Sinais de força adquiridos durante a execução de um furo	76
FIGURA 37 – Forças médias durante a execução de um furo	77
FIGURA 38 – Sistema para aquisição de imagens e avaliação de desgaste	78
FIGURA 39 – Exemplo de medição do desgaste de flanco máximo	80
FIGURA 40 – Posições da aquisição dos dados da textura superficial	81
FIGURA 41 – Posições da aquisição dos dados do erro de circularidade, cilindridade e diâmetro médio do furo	83

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

- FIGURA 42 – Tendência de evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) nas condições ensaiadas 87
- FIGURA 43 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) em todas condições ensaiadas 89
- FIGURA 44 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) em todas as condições ensaiadas .. 91
- FIGURA 45 – Tendência de evolução das rugosidades R_a e R_t dos furos para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) em todas as condições ensaiadas 93
- FIGURA 46 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) nas condições ensaiadas 94
- FIGURA 47 – Tendência de evolução do erro de cilindridade dos furos para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) nas condições ensaiadas 95
- FIGURA 48 – Tendência de evolução do diâmetro médio dos furos para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) nas condições ensaiadas 96
- FIGURA 49 – Face e flanco das ferramentas A3 (emulsão) e A5 (óleo mineral) aos 15 m de usinagem 97

FIGURA 50 – Tendência de evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas as condições ensaiadas	99
FIGURA 51 – Face das ferramentas B2 (a seco) e B4 (óleo vegetal) aos 12 e 15 m, respectivamente	100
FIGURA 52 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas condições ensaiadas	101
FIGURA 53 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas as condições ensaiadas	102
FIGURA 54 – Tendência de evolução das rugosidades R_a e R_t dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas as condições ensaiadas	104
FIGURA 55 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas as condições ensaiadas	105
FIGURA 56 – Tendência de evolução do erro de cilindridade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas as condições ensaiadas	106
FIGURA 57 – Tendência de evolução do diâmetro médio dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas as condições ensaiadas	107
FIGURA 58 – Estado final das brocas D1 e B1 após o colapso	109

- FIGURA 59 – Tendência de evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas 110
- FIGURA 60 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas . 111
- FIGURA 61 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas 112
- FIGURA 62 – Tendência de evolução das rugosidades R_a e R_t dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas 114
- FIGURA 63 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas 114
- FIGURA 64 – Tendência de evolução do erro de cilindridade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas 115
- FIGURA 65 – Tendência de evolução do diâmetro médio dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas 116
- FIGURA 66 – Desgaste apresentado nas faces e flancos da ferramenta de aço-rápido revestidas com TiN + MoS₂ (E2) aos 9 m na usinagem a seco 117

- FIGURA 67 – Desgaste apresentado na guia lateral e na face da ferramenta de aço-rápido revestida com $\text{TiN} + \text{MoS}_2$ (E1) aos 9 m na usinagem a seco 118
- FIGURA 68 – Tendência de evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de aço-rápido revestidas com $\text{TiN} + \text{MoS}_2$ (lote E) em todas as condições ensaiadas 119
- FIGURA 69 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de aço-rápido revestidas com $\text{TiN} + \text{MoS}_2$ (lote E) em todas condições ensaiadas 120
- FIGURA 70 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de aço-rápido revestidas com $\text{TiN} + \text{MoS}_2$ (lote E) em todas as condições ensaiadas 121
- FIGURA 71 – Tendência de evolução das rugosidades R_a e R_t dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com $\text{TiN} + \text{MoS}_2$ (lote E) em todas as condições ensaiadas 123
- FIGURA 72 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com $\text{TiN} + \text{MoS}_2$ (lote E) em todas as condições ensaiadas 124
- FIGURA 73 – Tendência de evolução do erro de cilindridade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com $\text{TiN} + \text{MoS}_2$ (lote E) em todas as condições ensaiadas 125
- FIGURA 74 – Tendência de evolução do diâmetro médio dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com $\text{TiN} + \text{MoS}_2$ (lote E) em todas as condições ensaiadas 127

FIGURA 75 – Desgastes da ferramenta C3 que usinou com emulsão a 15 m de usinagem	127
FIGURA 76 – Desgastes da ferramenta C2 que usinou a seco a 1,5 m de usinagem	128
FIGURA 77 – Desgastes da ferramenta C4 que usinou com QMFC aos 3,0 m de usinagem	128
FIGURA 78 – Estado da broca C5 (óleo mineral) a 4,41 m de usinagem	129
FIGURA 79 – Tendência de evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas as condições ensaiadas	130
FIGURA 80 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas condições ensaiadas	131
FIGURA 81 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas as condições ensaiadas	132
FIGURA 82 – Tendência de evolução das rugosidades R_a e R_t para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas as condições ensaiadas	133
FIGURA 83 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas as condições ensaiadas	134

FIGURA 84 – Tendência de evolução do erro de cilindridade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas as condições ensaiadas	135
FIGURA 85 – Tendência de evolução do diâmetro médio furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas as condições ensaiadas	136
FIGURA 86 – Estado final da ferramenta F2 que usinou empregando emulsão aos 30 m	137
FIGURA 87 – Tendência de evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas as condições ensaiadas	138
FIGURA 88 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas condições ensaiadas	139
FIGURA 89 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas as condições ensaiadas	140
FIGURA 90 – Tendência de evolução das rugosidades R_a e R_t para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas as condições ensaiadas	142
FIGURA 91 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas as condições ensaiadas	143

- FIGURA 92 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas as condições ensaiadas 144
- FIGURA 93 – Tendência de evolução do diâmetro médio dos furos para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas as condições ensaiadas 145
- FIGURA 94 – Estado da ferramenta G1 que usinou a seco aos 24 m de usinagem 146
- FIGURA 95 – Evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas as condições ensaiadas 147
- FIGURA 96 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas condições ensaiadas 148
- FIGURA 97 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas condições ensaiadas 149
- FIGURA 98 – Tendência de evolução das rugosidades Ra e Rt para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas as condições ensaiadas 151
- FIGURA 99 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas as condições ensaiadas 152

- FIGURA 100 – Tendência de evolução do erro de cilindridade dos furos para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas as condições ensaiadas 153
- FIGURA 101 – Tendência de evolução do diâmetro médio dos furos para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas as condições ensaiadas 154
- FIGURA 102 – Valores máximos do desgaste de flanco $VB_{máx}$ para as brocas de aço-rápido ensaiadas em diferentes condições de lubrificação e refrigeração 156
- FIGURA 103 – Valores máximos do desgaste de flanco $VB_{máx}$ para as brocas de metal-duro ensaiadas em diferentes condições de lubrificação e refrigeração 158

LISTA DE TABELAS

2. ESTADO DA ARTE

TABELA 1 – Principais classes de metal-duro, propriedades e aplicações	21
TABELA 2 – Propriedades de carbonetos de grão fino e convencional	22
TABELA 3 – Participação de cada fator nos esforços da furação	33
TABELA 4 – Precisão média de furos produzidos com brocas helicoidais	49

3. MATERIAIS E MÉTODOS

TABELA 5 – Informações técnicas sobre as brocas ensaiadas	68
TABELA 6 – Parâmetros de corte	68
TABELA 7 – Seqüência de atividades para execução do ensaio	73

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

TABELA 8 – Ferramentas de aço-rápido sem revestimento (Lote A)	86
TABELA 9 – Ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (Lote B)	98
TABELA 10 – Ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (Lote D)	108

TABELA 11 – Ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN+MoS ₂ (Lote E)	118
TABELA 12 – Ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (Lote C)	127
TABELA 13 – Ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (Lote F)	137
TABELA 14 – Ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (Lote G)	147

LISTA DE REDUÇÕES

ABREVIATURAS

et al. _____ Mais de três autores

SIGLAS

ABNT	_____	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AR	_____	Aço-rápido
CBN	_____	Nitreto de Boro Cúbico
CCD	_____	Charged Couple Device
CERTI	_____	Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras
CNC	_____	Controle Numérico Computadorizado
CVD	_____	Chemical Vapour Deposition
DIN	_____	Deutsche Industrie-Norm
HS	_____	High Speed Steel
HV	_____	Dureza Vickers
ISO	_____	International Standard Association
LMP	_____	Laboratório de Mecânica de Precisão
MD	_____	Metal-duro
PCBN	_____	Nitreto de Boro Cúbico Policristalino
PCD	_____	Diamante Policristalino
PVD	_____	Physical Vapour Deposition
MQFC	_____	Mínima Quantidade de Fluido de Corte
QS	_____	Quality Standard

SÍMBOLOS

γ	[°]	Ângulo de Saída
α_0	[°]	Ângulo de Incidência Ortogonal
λ	[°]	Ângulo de Inclinação do Gume
ξ_r	[°]	Ângulo de Direção do Gume
ε_r	[°]	Ângulo de Quina
κ_r'	[°]	Ângulo de Direção do Gume Secundário
σ	[°]	Ângulo de Ponta
κ_r	[°]	Ângulo de Direção do Gume
α_n	[°]	Ângulo de Incidência Normal
χ	[°]	Ângulo do Gume Transversal
γ_f	[°]	Ângulo de Saída Lateral
δ	[°]	Ângulo de Hélice
α_n'	[°]	Ângulo de Incidência Normal do Gume Secundário
r_ε	[°]	Raio de Quina
π	_____	Pi
$1-m_c$	_____	Expoente da Equação de Força de Corte Proposta por Kienzle
a_p	[mm]	Profundidade de Corte
Al	_____	Alumínio
AlN	_____	Nitreto de Alumínio
AlON	_____	Nitreto Óxido de Alumínio ou Oxinitreto de Alumínio
Al ₂ O ₃	_____	Óxido de Alumínio
BN	_____	Nitreto de Boro
CH ₄	_____	Metano
C_m	[mm]	Largura do Desgaste do Gume Transversal
Co	_____	Cobalto
CrN	_____	Nitreto de Cromo
C_t	[mm]	Altura do Desgaste do Gume Transversal
D	[mm]	Diâmetro do Furo
d	[mm]	Diâmetro da Broca

f	[mm]	Avanço
F_c	[N]	Força de Corte
Fe	—	Ferro
F_f	[N]	Força de Avanço
F_p	[N]	Força Passiva de Corte
F_x	[N]	Força na Direção X; Força de Avanço; Força Axial
H_2	—	Hidrogênio
K	—	Relação de Desgaste
k_a	[N/mm ²]	Pressão Específica de Corte na Direção Normal ao Gume
k_c	[N/mm ²]	Pressão Específica de Corte
$k_{c1.1}$	[N/mm ²]	Pressão Específica de Corte para um Cavaco com Seção de Usinagem de 1 mm ²
KL	[mm]	Largura da Cratera
KM	[mm]	Afastamento Médio da Região mais Profundada Cratera
K_m	[mm]	Desgaste de Cratera
KT	[mm]	Profundidade da Cratera
l	[mm]	Comprimento da Broca
$L_{usinado}$	[mm]	Comprimento Linear Usinado
Mo	—	Molibdênio
MoS_2	—	Bissulfeto de Molibdênio
M_t	[N.m]	Momento Torçor
M_w	[mm]	Desgaste de Guia Lateral
n	[rpm]	Rotação
Ni	—	Níquel
NbC	—	Carboneto de Nióbio
p	[mm]	Profundidade do Furo
P_c	[kW]	Potência de Corte
P_m	[mm]	Largura do Lascamento do Gume
P_t	[mm]	Altura do Lascamento do Gume
R_a	[μ m]	Rugosidade Média Aritmética
$R_{máx}$	[μ m]	Rugosidade Máxima
R_t	[μ m]	Profundidade Máxima de Rugosidade

R_z	[μm]	Rugosidade Média
Si	_____	Silício
SiC	_____	Carboneto de Silício
SV_α	[mm]	Deslocamento do Gume Medido sobre o Flanco da Ferramenta
SV_γ	[mm]	Deslocamento do Gume Medido sobre a Face da Ferramenta
TaC	_____	Carboneto de Tântalo
t_c	[min]	Tempo de Corte
TiAlN	_____	Nitreto de Titânio e Alumínio
Ti_2AlC	_____	Carboneto de Titânio e Alumínio
TiC	_____	Carboneto de Titânio
$TiCl_4$	_____	Tetracloroeto de Titânio
TiCN	_____	Carbonitreto de Titânio
V	_____	Vanádio
VC	_____	Carboneto de Vanádio
VB	[mm]	Largura da Marca de Desgaste de Flanco
VB'	[mm]	Largura da Marca de Desgaste de Flanco no Ponto Médio
$VB_{m\acute{o}x}$	[mm]	Largura da Marca de Desgaste de Flanco Máximo
v_c	[m/min]	Velocidade de Corte
v_{ce}	[m/min]	Velocidade de Corte Efetiva
v_f	[mm/min]	Velocidade de Avanço
v_{60}	[m/min]	Velocidade de Corte na qual a Vida Efetiva da Ferramenta é de 60 Minutos
WC	_____	Carboneto de Tungstênio
W	[mm]	Desgaste de Quina
ZrCN	_____	Carboneto de Zircônio
ZrO_2	_____	Óxido de Zircônio

1 INTRODUÇÃO

Entende-se por operações de usinagem aquelas que através do corte de um material ou peça levam-na à forma, dimensões, acabamento ou a uma combinação destes três itens resultando na produção de cavacos [1, 2]. Dentre as operações de usinagem, a furação com brocas helicoidais destaca-se por ser uma das mais utilizadas na indústria metal-mecânica [3, 4].

Visando aprimorar técnica e economicamente o desempenho das operações de usinagem utilizam-se com frequência produtos auxiliares, conhecidos como meios lubri-refrigerantes, fluidos de corte e óleos de corte [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8]. Estes produtos têm influência direta na vida das ferramentas, no acabamento superficial e na precisão geométrica das peças, além de facilitarem a quebra e o transporte de cavacos [9]. Porém, apesar de gerarem certos benefícios, existem aspectos negativos associados aos mesmos. A utilização, manutenção e descarte destes produtos pode representar um risco à saúde e ao meio ambiente, além de elevar os custos de produção [1, 5, 6, 10 - 20]. Os problemas de saúde desenvolvidos mais comuns são dermatites, danos no aparelho respiratório e diversos tipos de câncer [1, 5, 6, 8, 18, 20 - 24].

A agressão ao meio ambiente pode acontecer durante a utilização, processamento e descarte, onde acidentes e perdas por vazamento, arraste, emissões e descarga podem levar à contaminação do solo, do ar e da água [8, 18, 24]. Os custos elevados estão associados à utilização, monitoramento, manutenção e descarte dos produtos. Devem ser contabilizados os custos associados aos problemas de saúde causados principalmente aos operadores de máquinas que podem afastá-los do trabalho temporariamente e em certos casos definitivamente [8, 9, 24 - 32].

Atualmente o aumento da conscientização ambiental, o surgimento de leis mais severas e a necessidade de reduzir custos têm levado as empresas da área produtiva, a qual é apontada como a principal responsável pela agressão ao meio ambiente, a reverem seus processos. Procura-se cada vez mais se atingir a "produção limpa" [24, 30]. Isto tem levado ao surgimento de novas alternativas de trabalho, como também a inovações tecnológicas as quais estão associadas diretamente ou indiretamente à lubrificação e refrigeração no

processo de usinagem. A usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido de corte (MQFC) têm se mostrado como uma tendência mundial apesar de reduzir e até mesmo eliminar as funções primárias dos meios lubri-refrigerantes (refrigeração, lubrificação e transporte de cavacos) [9, 26, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38]. Conseqüentemente surgiram nos últimos anos novos materiais e revestimentos que aumentam a resistência das ferramentas de corte ao desgaste e que permitem que estas usinem em temperaturas elevadas compensando a ausência e até mesmo a inexistência dos meios lubri-refrigerantes no processo [2, 26, 39, 40]. Além disso, o desenvolvimento e a utilização de novos produtos, como óleos à base vegetal e animal, conhecidos como “ecologicamente corretos ou verdes” também surgem como resultado desta nova forma de produção [12, 41].

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a influência da minimização e eliminação do fluido de corte na furação com broca helicoidal. Além disso, de forma complementar, a influência do revestimento nestas condições de trabalho. Para tal, testaram-se quatro condições distintas de lubrificação e refrigeração, usinagem a seco, usinagem com mínima quantidade de fluido de corte (MQFC) utilizando óleo vegetal e mineral, e a usinagem com emulsão. A usinagem a seco foi escolhida por representar, do ponto de vista ecológico, a melhor alternativa de trabalho. A usinagem com emulsão por empregar um dos produtos lubri-refrigerantes mais utilizados no setor metal-mecânico, mesmo sendo apontado como um dos mais agressivos à saúde e ao meio ambiente, segundo Eversheim et. al. [24]. A usinagem com mínima quantidade de fluido de corte (MQFC), por sua vez, por representar um elo de ligação entre a forma tradicional (emulsão) e a ideal de trabalho (seco), além de consumir um volume muito pequeno deste produto.

As brocas ensaiadas foram de aço-rápido DIN338 de 10 mm de diâmetro não-revestidas e revestidas, com nitreto de titânio (TiN), nitreto de titânio mais bisulfeto de molibdênio (TiN+MoS₂) e nitreto de titânio e alumínio (TiAlN). Também foram ensaiadas brocas de metal-duro DIN338 de 10 mm de diâmetro, classe P40 revestidas com TiN e TiAlN. Como material a ser usinado utilizaram-se corpos de prova de aço ABNT1040. A influência tecnológica das diferentes condições de refrigeração e lubrificação foi avaliada em função dos esforços de corte, desgaste da ferramenta e qualidade do processo. Os esforços de corte foram analisados em função da evolução da força axial e momento torçor juntamente com a evolução do desgaste de flanco. A qualidade do processo foi avaliada

através de parâmetros como as rugosidades R_a e R_v , o erro de circularidade e o de cilindricidade, e o diâmetro médio do furo.

Este estudo visa contribuir no aprimoramento da eficiência tecnológica, econômica e ecológica do processo de furação, onde a necessidade do desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias é cada vez maior.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 O Processo de Furação

A furação é um dos processos de fabricação mais antigos utilizados pelo homem. Existem registros que mostram que na idade da pedra já se utilizava sílex e ossos como ferramentas em uma espécie de furadeira manual como ilustrado na figura 1 [41].

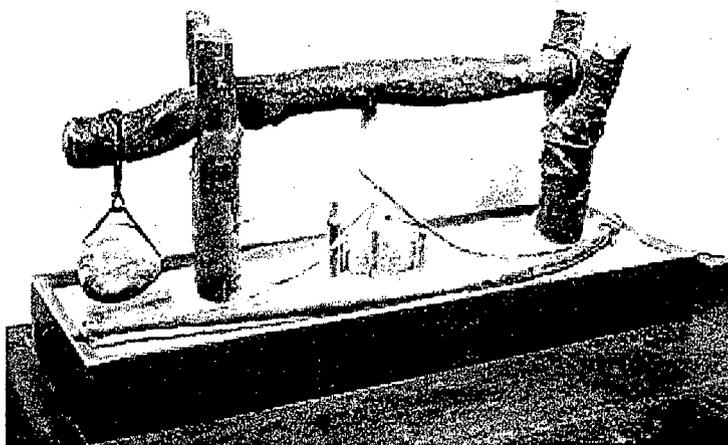


FIGURA 1 – Furadeira manual neolítica [41].

A furação é a operação de usinagem que produz furos cilíndricos por meio do movimento relativo entre uma ferramenta de corte e uma peça. A ferramenta de corte, a peça ou ambas podem ter movimento rotativo, com a ferramenta apresentando geralmente o movimento de avanço [1, 2, 3, 5]. A maioria dos furos é produzida dentro da faixa de diâmetro, entre 1-20 mm [2, 25, 45].

Esta operação está incluída no grupo de processos de fabricação por usinagem com gumes de geometria definida, sendo um dos processos de usinagem mais utilizado [2, 4, 5, 42, 43, 44, 46]. Juntamente com o torneamento, é uma das operações mais importantes, contemplando aproximadamente de 30% a 40% de todas as operações de usinagem de metal, como mostra a figura 2 [4, 25].

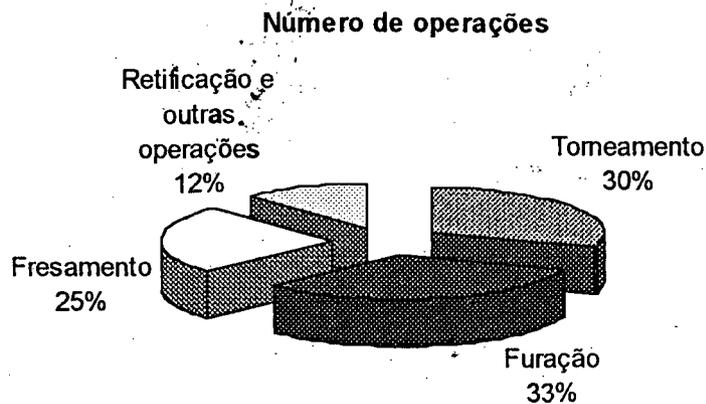


FIGURA 2 – Participação da furação com brocas helicoidais em comparação com outras operações de usinagem [4].

Geralmente é uma das operações que determina o menor ciclo de tempo possível em uma linha de produção automatizada, como mostra a figura 3 [4].

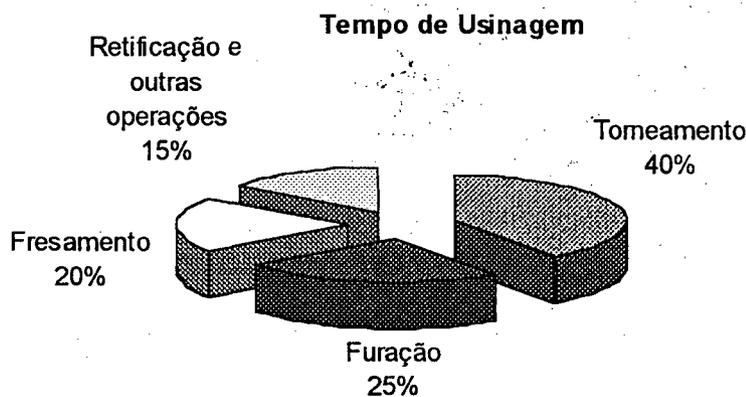


FIGURA 3 – Percentual do tempo gasto na furação comparado às outras operações usinagem [4].

- processo de furação apresenta certas particularidades tais como [3, 4, 47]:
 - O processo de geração do cavaco é escondido e invisível;
 - A velocidade de corte não é uniforme, variando desde zero no centro do furo até um máximo na periferia, sendo isto um grande problema;
 - O fluido de corte chega com dificuldades à parte de trabalho da ferramenta;

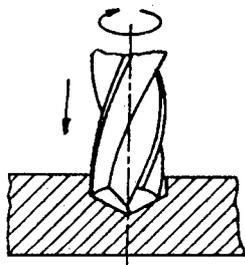
- Existe um espaço limitado nos canais para a remoção do cavaco com isso o transporte do mesmo para fora da região de corte é dificultado;
- Há uma distribuição inadequada de calor na região de corte e;
- Ocorre atrito e desgaste pronunciado nas quinas com cantos vivos.

Além da furação com brocas, existem outros processos para a produção de furos como o forjamento, puncionamento, extrusão, jato d'água de alta energia, fundição, eletroerosão, feixe laser, feixe de elétrons e usinagem eletroquímica [5, 25].

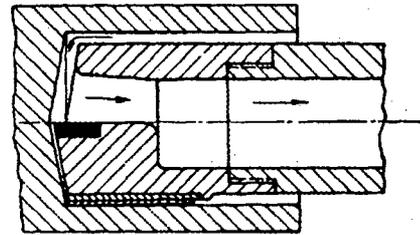
Existem muitos métodos diferentes de furação incluindo o convencional, de furos curtos, de furos profundos e de pequenos furos [2, 3; 5]. A escolha do método mais adequado de furação depende de vários fatores como tamanho, profundidade, tolerância dimensional, tolerância geométrica, acabamento necessário, máquinas e tecnologia disponíveis, entre outros [2, 5]. Quanto maior a profundidade do furo geralmente maior é a qualidade exigida, sendo maior a dificuldade de controle do processo e remoção dos cavacos. Os furos curtos são os mais usuais e requerem altas taxas de remoção de material para que a produção seja economicamente viável.

Pode-se dizer que a diferença entre uma furação curta e uma profunda não se restringe apenas à relação entre a profundidade e o diâmetro do furo. Parâmetros como a saída do cavaco, qualidade do furo e taxa de remoção de material formam a base para diferenciar a furação curta da profunda. Para muitos autores, de uma maneira simplificada pode-se considerar a furação curta quando a relação entre a profundidade (p) e diâmetro (D) do furo é baixa. Para diâmetros iguais ou menores que 30 mm os furos podem ter a profundidade máxima de 3 a 6 vezes maior que o diâmetro. No caso de furos profundos ($p > 6D$) e para os diâmetros maiores que 30 mm esta relação está limitada a profundidades de até 2,5 vezes maior que o diâmetro [2, 3].

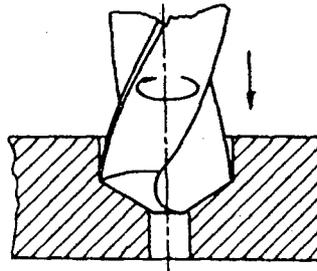
A furação pode ser subdividida em cinco operações básicas, descritas a seguir e mostradas na figura 4 [1, 41, 47]:



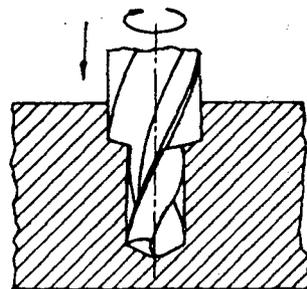
a1) Furação em cheio



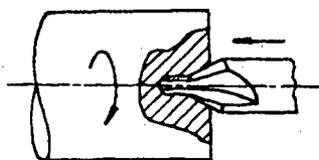
a2) Furação profunda em cheio



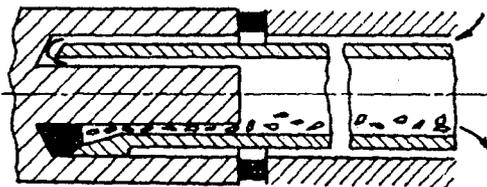
b) Furação com pré-furo (escareamento)



c) Furação escalonada



d) Furação de centro



e) Trepanação

FIGURA 4 – Subdivisão do processo de furação [47].

a) *Furação em cheio*: destinada à abertura de furo cilíndrico em uma peça, removendo todo o material compreendido no volume do furo final, na forma de cavaco. No caso de furos de grande profundidade há necessidade de se utilizar ferramentas especiais.

b) *Escareamento*: tem como objetivo aumentar o diâmetro de um furo numa peça.

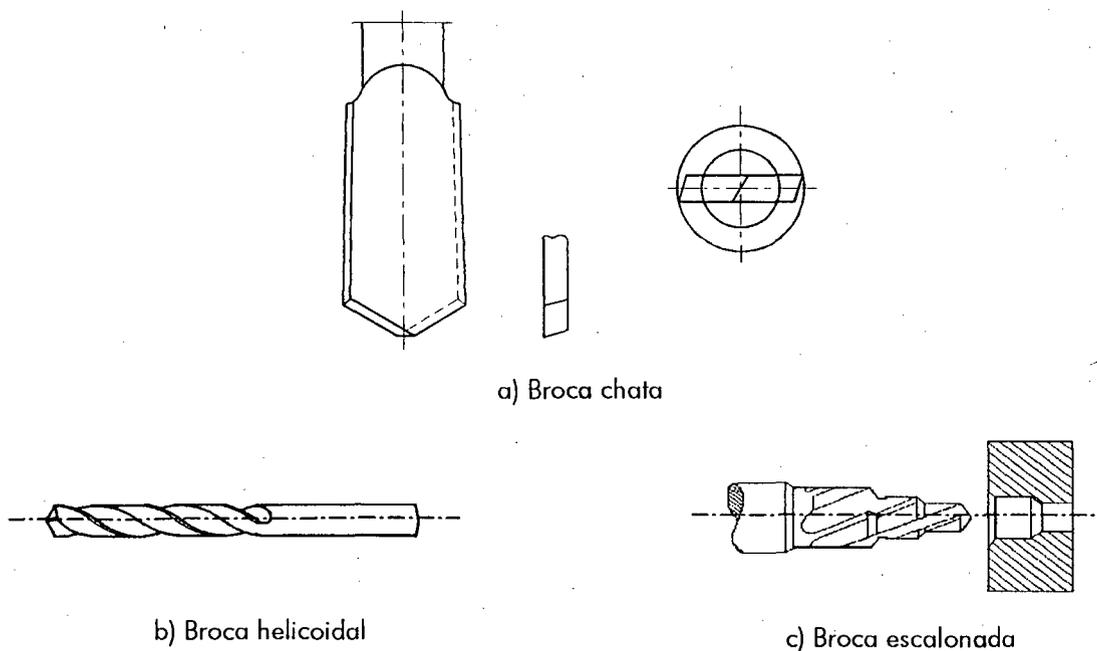
c) *Furação escalonada*: destinada à obtenção de um furo com dois ou mais diâmetros, simultaneamente.

d) *Furação de centro*: obtém furos de centro, visando uma operação posterior na peça.

e) *Trepanação*: é o processo de furação em que apenas uma parte do material compreendido no volume do furo final é reduzido a cavaco, permanecendo um núcleo maciço.

2.2 Tipos de Brocas

Em função das características da operação de furação (diâmetro do furo, profundidade, tolerâncias de forma, de medidas e volume de produção) pode-se utilizar diferentes tipos de brocas como mostra a figura 5 [3, 47, 48]:



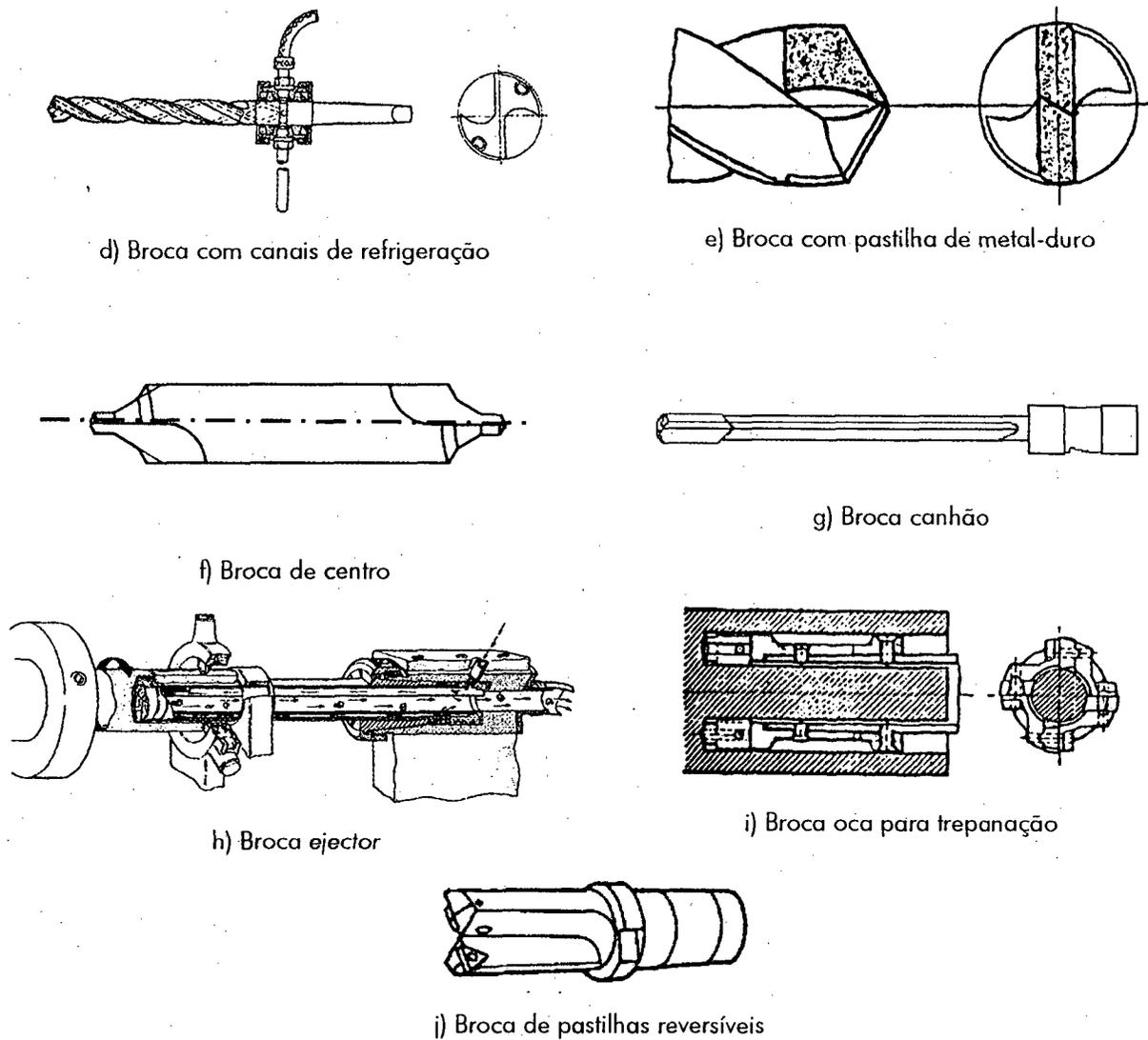


FIGURA 5 – Tipos de brocas [47].

a) *Brocas chatas*: são as ferramentas de furação mais antigas, obtidas por achatamento a quente de uma parte de uma barra cilíndrica ou por encaixe de uma lâmina. São utilizadas em operações pouco profundas, em materiais frágeis e na furação de madeira.

b) *Brocas helicoidais*: são as ferramentas de maior importância na furação, sendo as principais na obtenção de furos cilíndricos, pré-furados ou maciços.

c) *Brocas escalonadas*: estas ferramentas possuem dois ou mais diâmetros diferentes dispostos de forma escalonada e retificados conforme a padronização das brocas

helicoidais. Indicadas para a produção seriada em tornos automáticos para a execução de furos com dois ou mais diâmetros diferentes, ou para combinar operações de furação, alargamento ou chanframento.

d) *Brocas com canais de refrigeração*: são empregadas na furação profunda, onde a remoção do calor e do cavaco é problemática.

e) *Brocas helicoidais com pastilhas de metal-duro*: estas ferramentas são utilizadas na execução de furos em materiais abrasivos, em aços de usinagem difícil e em casos em que a vida das brocas de aço rápido é muito pequena.

f) *Brocas de centro*: executam pré-furos conhecidos como furos de centro em peças que devem ser usinadas entre pontas, em operações de precisão e na furação profunda.

g) *Brocas canhão*: estas ferramentas são constituídas de um corpo de aço tenaz, com uma canaleta em V, com ponta ou pastilha de metal duro. São usadas para a furação profunda (10 a 100 diâmetros) e nos diâmetros de 2 a 32 mm.

h) *Broca ejector*: este sistema foi desenvolvido para furos profundos, com diâmetros superiores a 15 mm. O sistema consta de dois tubos concêntricos, onde o fluido de corte é bombeado pelo espaço entre o tubo interno e o externo.

i) *Brocas ocas*: são utilizadas acima de 60 mm de diâmetro para operação de trepanação. Nestas brocas reduz-se o trabalho de produção de cavaco e resulta num núcleo aproveitável.

j) *Brocas de pastilhas reversíveis*: são empregadas na furação curta. Neste tipo de ferramenta há a eliminação do gume transversal devido ao posicionamento dos gumes de corte, o que permite um corte da peça até o eixo da ferramenta.

2.3 Furação com Brocas Helicoidais

As brocas helicoidais ou espirais são as ferramentas mais usadas e importantes entre todos os tipos de brocas, para a execução de furos [3, 4, 47]. A broca helicoidal foi inventada pela “Moses Twist Drill and Machine Company” e hoje em dia ainda é a ferramenta mais importante (para diâmetros entre 1 e 20 mm) utilizada na produção de furos cilíndricos em cheio ou no alargamento de furos já existentes [3, 4, 5, 47]. A participação das brocas helicoidais em todas as atividades de corte de metais está estimada em 20% - 25% do total, sendo de todas as ferramentas de corte a que é fabricada em maior quantidade e a mais difundida na indústria [3, 4].

Esta ferramenta deve atender a diversos requisitos tais como [4]:

- Os gumes de corte devem gerar dois cavacos idênticos;
- Os cavacos devem ser conduzidos pelos canais helicoidais para fora do furo;
- As forças e o torque necessário devem ser transmitidos pelo corpo da broca;
- A ferramenta deve ser guiada primeiramente pela ponta da broca em seguida pelas guias laterais no diâmetro externo.

De uma certa forma estes requisitos se contradizem entre si, visto que se por um lado os canais helicoidais devem ser largos o suficiente para se ter o espaço necessário para a condução dos cavacos, por outro a haste ou o corpo da broca deve ter força e rigidez suficientes para transmitir o torque e as forças sem que haja a quebra, deformações e vibrações [4].

2.3.1 Nomenclatura das Brocas Helicoidais

A nomenclatura das diversas partes das brocas helicoidais é mostrada na figura 6 a seguir [3, 5, 41, 47, 49]:

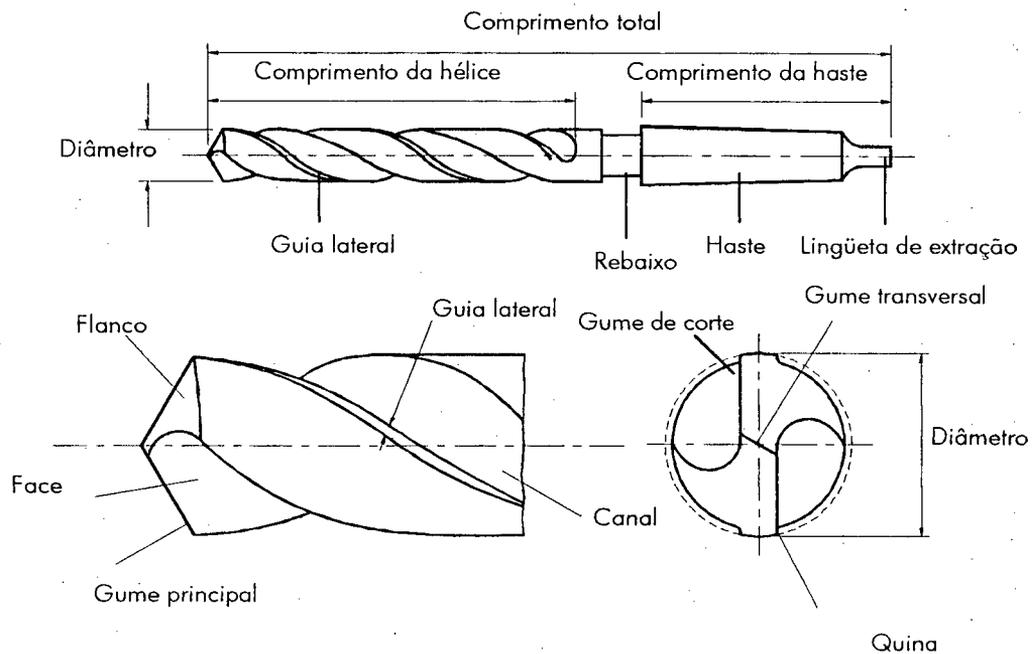


FIGURA 6 – Nomenclatura da broca helicoidal [47].

Canais helicoidais: são espaços destinados à remoção dos cavacos, sendo estes usinados ou formados no corpo da broca para constituírem os gumes de corte, permitirem a saída dos cavacos e possibilitarem a chegada do fluido de corte nos gumes.

Gumes de corte: cada parte do gume de corte pode ser analisada de forma análoga a uma ferramenta de corte simples. O gume principal de uma broca helicoidal é formado pelo gume transversal e pelos dois gumes de corte. Nas brocas com afiação normal (tronco de cone), os dois gumes principais, vistos de frente, são paralelos entre si e vistos de lado formam um ângulo de ponta σ , cujo valor depende do material a ser usinado e das condições de trabalho.

Gume transversal: situado na ponta da broca, liga entre si os gumes de corte. Seu comprimento depende do diâmetro da alma (núcleo da broca). O gume transversal apresenta uma geometria de corte extremamente negativa de forma que o material deformado por ele não forma cavaco e sim é extrudado radialmente em direção aos gumes

de corte. No centro da broca a velocidade de corte efetiva v_{ce} é igual à velocidade de avanço v_f . Sobre todo o gume transversal a velocidade de corte é muito baixa. Participa pouco do momento torçor na usinagem (4 a 10%), e consideravelmente na força axial de avanço em 30 a 65%.

Guias e nervuras: constituem a parte sólida da broca. Para reduzir o atrito da broca no furo, o corpo da broca é rebaixado e o trabalho de guiá-la é realizado pela guia. Além disso, a broca é retificada no seu diâmetro em direção à haste com uma leve conicidade, reduzindo-se o seu diâmetro em direção à haste de 0,02 a 0,08 mm por 100 mm de comprimento.

Haste: serve para a fixação da broca no dispositivo da máquina-ferramenta, podendo ser cônica ou cilíndrica estando localizada na parte anterior da ferramenta.

2.3.2 Geometria das Brocas Helicoidais

A broca deve apresentar a geometria adequada para que possa usinar de forma eficiente [41]. Os principais ângulos de uma broca helicoidal são [1, 2, 3, 5, 41, 46, 47, 49]:

Ângulo de saída (γ): é responsável pelo corte e estabilidade da cunha cortante, sendo variável ao longo do gume, decrescendo na direção quina-centro da broca. Na quina o seu valor é aproximadamente o valor do ângulo de hélice.

Ângulo de hélice (δ): a norma ABNT PB-286 (DIN 1836) recomenda a classificação das brocas quanto ao ângulo de hélice em três tipos: N ou normal, H para materiais duros e frágeis e W para materiais dúcteis. As hélices são usualmente à direita, porém hélices à esquerda podem ser encontradas.

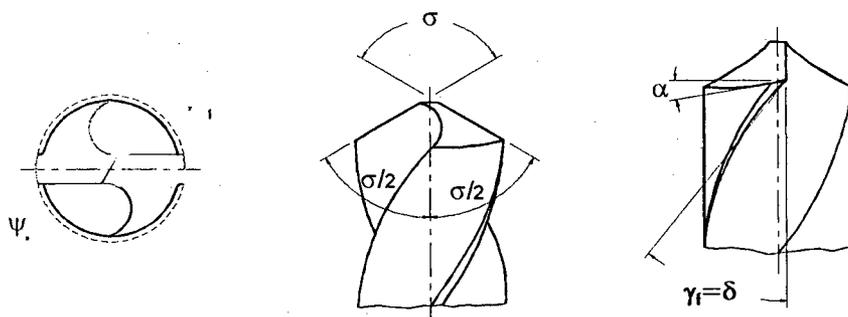


FIGURA 7 – Geometria da broca helicoidal [47].

Ângulo de ponta (σ) é o ângulo formado entre as partes cortantes do gume principal. É normalmente 118° , quando acima ou abaixo deste valor tende a gerar problemas na usinagem como o enganchamento e quebra das pontas como também vibrações.

Ângulo de incidência (α): é obtido por meio de uma afiação adequada, estando usualmente entre 12 e 15° . Para materiais duros este valor passa a ser de 5 a 7° . O ângulo de incidência alto evita o esmagamento do material pelo flanco da broca e favorece a força de avanço, porém se o seu valor for muito alto o gume e a cunha perdem resistência.

Ângulo do gume transversal (χ): é formado pela interseção do gume de corte com o transversal, sendo influenciado pelo ângulo de incidência.

2.3.3 Classificação das Brocas Helicoidais

A classificação pode ser feita por diferentes critérios como pelo material de que são feitas, tipos de haste, número de canais, direção de corte, comprimento, diâmetro e geometria da ponta. Segundo o tipo de haste pode-se classificá-las em [5]:

Brocas de haste reta: possuem haste cilíndrica que pode ter o mesmo ou diâmetro diferente do corpo da broca. Esta haste pode possuir ou não encaixe plano, lingüeta de arraste, roscas e canais.

Brocas de haste cônica (cone morse): estas brocas possuem haste cônica para encaixe direto em furos cônicos em eixos de máquinas, soquetês e luva motriz. Este tipo de haste geralmente tem uma lingüeta para auxiliar no direcionamento e permitir a remoção da broca do eixo ou suporte.

Segundo o número de canais, as brocas helicoidais podem ser classificadas em [5]:

Brocas com canal simples: estas ferramentas, tendo apenas um canal são utilizadas para a geração de furos, principalmente em plásticos.

Brocas com dois canais: estas são brocas convencionais e as mais utilizadas na obtenção de furos cilíndricos.

Brocas com três ou quatro canais: estas ferramentas são normalmente empregadas no alargamento e acabamento, de furos obtidos por fundição ou puncionamento. Não são adequadas para a furação em cheio.

Segundo o sentido de corte, as brocas helicoidais podem ser classificadas em [5, 47]:

Corte à direita: tomando como referência uma vista frontal da ferramenta, estas cortam girando no sentido anti-horário. A maior parte das brocas helicoidais são de corte à direita.

Corte à esquerda: ao contrário das anteriores, estas ferramentas cortam no sentido horário.

2.4 Materiais para Ferramentas de Furação

Os materiais para ferramentas têm apresentado intenso desenvolvimento, e têm sido estudados por quase todo o século XX, principalmente a partir da década de 30. Conseqüentemente, desde 1900, antes do surgimento do aço-rápido até hoje, as condições de corte puderam ser aumentadas em mais de 100 vezes, reduzindo o tempo de fabricação do furo na mesma proporção. Pode-se dizer que o desenvolvimento destes materiais ajudou a construir o mundo industrial moderno e eficiente [2].

A melhora do desempenho dos materiais para ferramentas de corte tem acompanhado o aumento da velocidade de corte, das taxas de avanço e vida das ferramentas. Com isso, a eficiência econômica e tecnológica da operação de furação tem tido uma grande evolução [4].

Hoje em dia existem combinações entre o material da ferramenta, da peça, parâmetros de corte e tipo de operação que levam a uma usinagem otimizada. Além do surgimento de novos materiais, o aço-rápido, que ainda é um dos materiais mais utilizados para a fabricação de ferramentas de corte rotativas na indústria metal-mecânica, sofreu grande evolução, possibilitando um grande aumento na velocidade de corte. Mas uma melhora significativa da usinagem deveu-se ao desenvolvimento de novos metais-duros para ferramentas de corte [2].

A escolha do material da ferramenta depende de fatores como [1, 3, 5, 6]:

- Operação a ser realizada;
- Forma e material da peça;
- Máquina-ferramenta;
- Parâmetros de usinagem;
- Utilização ou não de fluido de corte;
- Precisão e acabamento requeridos;
- Estabilidade do processo (ferramenta/peça/máquina);
- Quantidade de material a ser removido e;
- Custos de usinagem.

Os diversos materiais para ferramentas de corte utilizados atualmente podem ser agrupados como na figura 8 [1, 3, 6]:

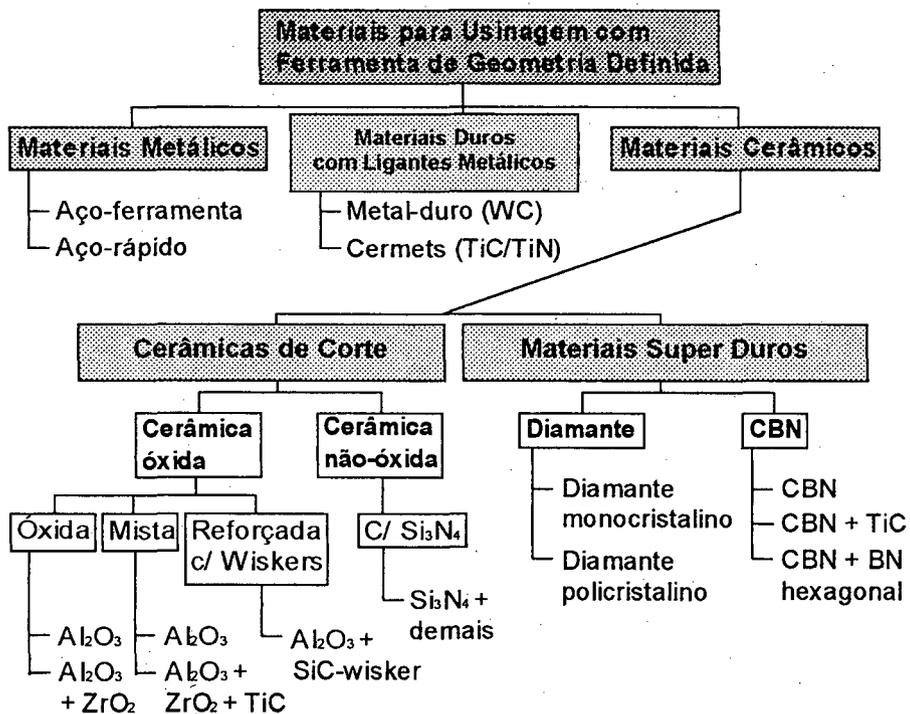


FIGURA 8 – Materiais para ferramentas de corte [3].

Dos materiais para ferramentas de corte buscam-se as seguintes características [2, 3, 5, 6]:

- Elevada dureza a frio e a quente, para resistir aos mecanismos de desgaste e à deformação;
- Elevada resistência à compressão e flexão;
- Alta tenacidade, para resistir aos esforços de corte, impactos e à fratura;
- Quimicamente inertes ao material da peça;
- Resistência interna de ligação entre os elementos que o constituem;
- Quimicamente estáveis, resistindo à oxidação e difusão e;
- Boa resistência a choques térmicos.

A seleção correta do material da ferramenta é, dentre outros fatores, a chave para uma usinagem econômica. O aço-rápido e o metal-duro dominam atualmente o mercado e são os mais importantes na fabricação de brocas [2]. Além destes dois materiais já consolidados, existem novos tipos sendo estudados e testados em operações de furação como os Cermets, os materiais cerâmicos e os super-duros [4].

2.4.1 Aço-rápido

O primeiro material a ser usado na construção de brocas foi o aço-ferramenta, sendo substituído na virada do século pelo aço-rápido, apresentado por F.W. Taylor na Exposição Mundial de Paris, em 1900 [4, 6]. A maior área de aplicação está na furação onde pelo menos 80% das ferramentas são de aço rápido [50, 52]. Algumas características relevantes deste material são [1, 3, 4, 5, 6, 50]:

- O gume perde a capacidade de corte entre 500 e 600°C devido ao fato da estabilidade térmica e a resistência ao desgaste serem significativamente reduzidas em temperaturas acima dos 500°C pela perda da dureza secundária;
- A velocidade de corte máxima na usinagem de materiais ferrosos é de aproximadamente de 50 m/min;
- Entre os materiais utilizados atualmente em ferramentas de corte é o que apresenta a menor dureza e a mais alta tenacidade e;

- Contém de 0,6 a 1,6% de carbono, cerca de 4% de cromo, 7 a 10% de tungstênio, 4 a 5% de molibdênio, 0,9 a 3% de vanádio, 85 a 89% de ferro, sendo que de 5 a 7% desses materiais se apresenta na forma de carbonetos mistos e complexos.

Os aços-rápido podem ser classificados em:

Aço-rápido comum: foi o primeiro a ser utilizado, revolucionando a indústria mecânica no começo do século passado. Mantém a dureza até temperaturas que estão entre 520 e 600°C [6].

Aço-rápido com cobalto: também conhecido como aço super-rápido, surgiu em 1921 pela adição do cobalto aumentando a dureza a quente, resistência ao desgaste, temperatura de trabalho, porém reduzindo a tenacidade [6].

Aço-rápido revestido: dentre os revestimentos mais utilizados estão o nitreto de titânio (TiN), o carboneto de titânio (TiC), o carbonitreto de titânio (TiCN), nitreto de titânio e alumínio (TiAlN) e mais recentemente o bissulfeto de molibdênio (MoS₂). Os revestimentos são aplicados principalmente pelo processo físico de deposição de vapor (PVD) [2, 5, 6, 26, 51, 52, 53]. A espessura do revestimento está entre 1 e 10 µm, podendo ser constituído de uma ou mais camadas. O custo de uma ferramenta de aço-rápido revestida se comparado a uma convencional chega a ser 2-6 vezes maior. Entretanto, estas podem ter a vida aumentada em 5-10 vezes e ter taxas de remoção entre 50-100% maiores para um mesmo tempo de vida [5, 47, 51].

Aço-rápido sinterizado: o desempenho das ferramentas de aço-rápido melhorou muito através do método de fabricação por metalurgia do pó. Este método aumentou significativamente a vida da ferramenta se comparado ao método tradicional de fabricação [4]. Os aços-rápido produzidos convencionalmente tendem a formar segregações de carbonetos durante o resfriamento lento dos lingotes fundidos, principalmente nos de alta liga. Isto gera problemas indesejáveis tanto na fabricação como no desempenho da

ferramenta [5]. Quando obtidos através da metalurgia do pó, o controle das propriedades é mais eficiente, com isso obtém-se uniformidade e regularidade estrutural, melhor controle do tamanho dos grãos e a não existência de segregações [3, 5, 6]. Além destas vantagens tem-se ainda na sua fabricação uma melhor trabalhabilidade a quente, refino de grão, menor tendência à formação de trincas e tensões internas, melhor aderência do revestimento de TiN. Para o seu desempenho durante o corte consegue-se maior dureza a quente, resistência ao desgaste, velocidade e avanços maiores [5, 6].

2.4.2 Metal-duro

São materiais sinterizados constituídos de um ligante metálico nos quais tem-se embutidos os carbonetos como mostra a figura 9. A função do ligante (um metal do grupo do Fe, geralmente o Co) é construir a ligação entre os carbonetos frágeis e oferecer tenacidade, formando assim um corpo relativamente resistente. Os carbonetos por sua vez fornecem alta dureza a quente e resistência ao desgaste [1, 2, 4].

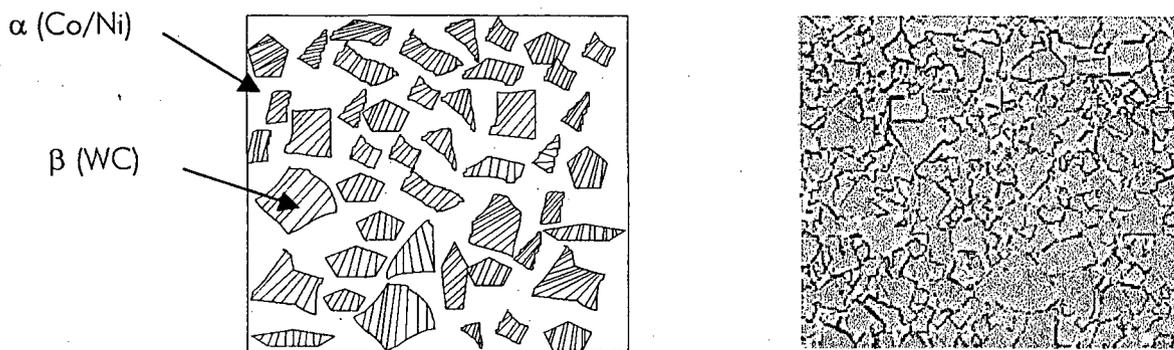
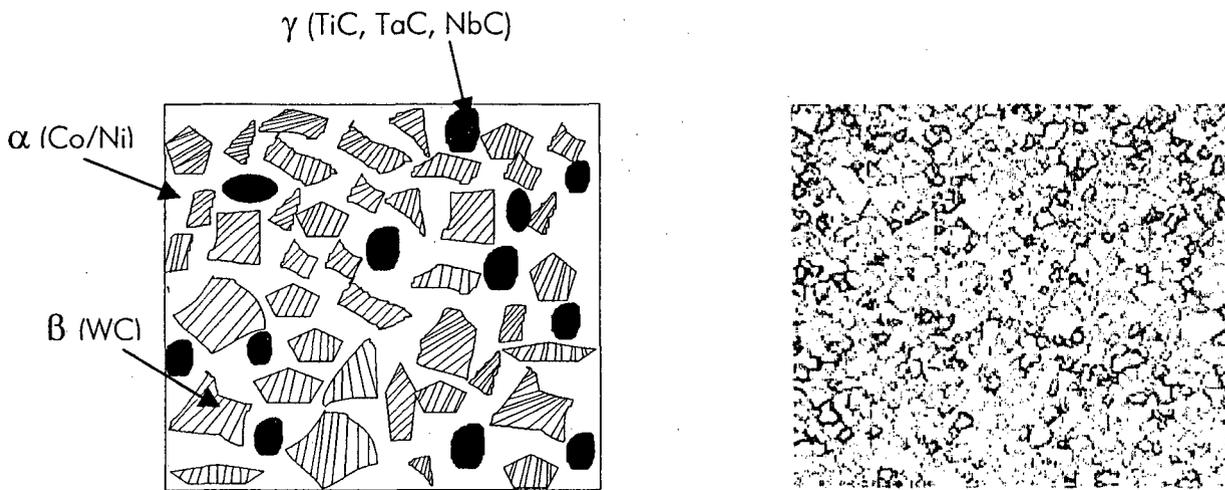


FIGURA 9 – Metal-duro com fases α e β [2].

O carboneto de tungstênio (WC) é o mais usado, podendo ser o único tipo de carboneto presente ou podendo estar combinado com outros carbonetos como mostrado na figura 10. Estes carbonetos podem ser de titânio (TiC), de tântalo (TaC) e de nióbio (NbC), que quando combinados com o de tungstênio melhoram o desempenho das ferramentas em temperaturas elevadas. Isto se deve ao fato destes aumentarem a resistência à oxidação, estabilidade térmica, dureza a quente e a resistência à difusão em ligas à base de ferro [2, 4].

FIGURA 10 – Metal-duro com fases α , β e γ [2].

As vantagens dos metais-duros estão na boa distribuição estrutural em decorrência do próprio processo metalúrgico de fabricação, dureza elevada, resistência à compressão e ao desgaste em elevadas temperaturas. O metal-duro, a 1000°C , tem a mesma dureza que o aço-rápido a temperatura ambiente. Além disso, tem-se a possibilidade de conseguir propriedades distintas nos metais duros, pela mudança específica dos carbonetos e das proporções do ligante. Os metais-duros podem ser subdivididos em metais-duros convencionais (do grupo P, M e K), metais-duros com alto teor de carboneto de titânio, metais-duros polivalentes e metais-duros revestidos e metais-duros de grão fino e ultra-fino.

2.4.2.1 O Metal-duro na Furação

As brocas de metal-duro necessitam ter uma geometria de ponta diferente das brocas de aço-rápido pois são menos tenazes. A ponta é projetada para que possam se auto-centrar no início da furação [4]. As principais classes de metal-duro utilizadas na furação com brocas estão apresentadas na tabela 1 em ordem decrescente de dureza [25]:

TABELA 1 – Principais classes de metal-duro, propriedades e aplicações [25].

Classe	Dureza [HV]	Resistência à flexão [N/mm ²]	Sensibilidade ao lascamento na furação	Aplicação em condições instáveis
K10	1870	3000	Muito alta	Impossível
K10/20	1620	3100	Alta	Ruim
K20	1700	3200	Média	Difícil
K40	1620	3700	Baixa	Boa
P25	1540	2300	Oscilante	Possível
P40	1420	2500	Muito baixa	Muito boa

2.4.2.2 O Metal-duro com Micro-grãos de Carbonetos

As ferramentas utilizadas na usinagem a seco ou quase a seco necessitam ter excelente dureza a quente. Desenvolveram-se então ferramentas de metal-duro com micro-grãos e nano-grãos com 8-10% de Co e tamanho de grão variando entre 0,1-1,0 μm [51, 54]. A tecnologia de micro-grãos e nano-grãos normalmente só é aplicada em classes puras à base de carboneto de tungstênio e cobalto, WC/Co. Por este motivo as classes tradicionais formadas por carbonetos mistos ainda mantêm sua importância na usinagem. No caso da furação, as brocas fabricadas com grãos-finos necessitam de revestimento para evitar a adesão do material da peça nas guias laterais da ferramenta.

Uma classificação sugerida por um fabricante de ferramentas em relação ao tamanho de grão é descrita abaixo [51]:

- Grão convencional – tamanho de grão menor que 1,5 μm ;
- Grão fino – tamanho de grão menor que 1,0 μm ;
- Grão mais fino – tamanho de grão menor que 0,7 μm ;
- Grão ultra-fino – tamanho de grão menor que 0,5 μm e;
- Nano grão - tamanho de grão menor que 0,1 μm .

Já segundo Tönshoff et al. [4] esta classificação pode ser feita da seguinte maneira:

- Grão convencional – tamanho de grão entre 2 e 5 μm ;
- Grão fino – tamanho de grão entre 0,8 – 1,0 μm e;

- Grão ultra-fino – grão menores que $0,5 \mu\text{m}$.

Como vantagens dos micro-grãos e nano-grãos pode-se citar [4, 51, 52]:

- Quanto menor o tamanho de grão mais tenaz é a ferramenta. Ferramentas de micro-grãos chegam a ser 50-60% mais tenazes que as com grãos convencionais. Isto permite a sua aplicação em condições instáveis;
- Os gumes de corte são mais afiados;
- A dureza é melhorada;
- Na furação de materiais endurecidos, a vida da ferramenta é mais longa que a das classes P40 e K10/20 com tamanhos de grão convencionais e;
- Possibilitam a usinagem de materiais que eram muito difíceis de serem usinados com ferramentas de geometria definida, como o aço endurecido e alguns tipos de materiais fundidos.

A tabela 2 mostra algumas propriedades do grão fino e do convencional [4].

TABELA 2 – Propriedades de carbonetos de grão fino e convencional [4].

Propriedades Físicas	Material da Ferramenta	
	Carboneto Convencional com 6% Co	Carboneto de Grão Fino com 6% Co
Densidade [g/cm^3]	14,9	14,9
Dureza [HV30]	1600	1800
Resistência à ruptura transversal [N/mm^2]	2000	3000
Resistência à compressão [N/mm^2]	5400	6000
Tenacidade à fratura [$\text{MPam}^{1/2}$]	9,6	10,8
Condutividade térmica [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	80	46
Coefficiente de expansão térmica [$\text{K}^{-1}10^{-6}$]	5,5	6,2

2.4.3 Cermet

É um material formado pela composição de uma ou mais fases cerâmicas com uma metálica que atua como ligante [6]. O termo Cermet deriva das três primeiras letras das palavras inglesa *ceramic* e *metal*. Apesar de seu uso estar crescendo nos últimos anos, as primeiras classes de ferramentas de Cermet já haviam aparecido em 1929 [2].

A forma de fabricação é praticamente a mesma do metal-duro convencional. Uma das diferenças entre o Cermet e o metal-duro está na microestrutura dos carbonetos. Ao invés do carboneto de tungstênio (WC), o Cermet possui como base o carboneto de titânio (TiC) e o carbonitreto de titânio (TiCN) formando a fase dura. O carboneto de tungstênio pode não estar presente e se estiver, está em pequenas quantidades [4].

Os principais componentes além do TiC e TiCN são o nitreto de titânio (TiN), carboneto de tungstênio (WC), carboneto de vanádio (VC), carboneto de tântalo (TaC), carboneto de nióbio (NbC); e níquel (Ni), cobalto (Co) e molibdênio (Mo) como ligantes metálicos [4, 54].

Os últimos desenvolvimentos do Cermet estão no aumento da quantidade de elementos de liga, refinamento microestrutural obtidos através da adição de carbonetos complexos ou nitretos de titânio e alumínio (Ti_2AlC , Ti_2AlN) [11]. Este material tem força de ligação comparável às classes P10-P30 de metal-duro e elevada dureza a quente, o que o torna adequado à construção de brocas [4].

2.4.4 Cerâmicas

As ferramentas cerâmicas empregadas na usinagem têm adquirido muita importância nos últimos tempos. Este material é muito usado em operações de acabamento no torneamento e fresamento de aço e ferro fundido por possuir alta estabilidade química e resistência ao desgaste. Na furação é mais usada na forma de pastilha intercambiável em ferramentas de grande diâmetro. Existem dois tipos básicos de cerâmicas, as óxidas e as não-óxidas [2, 3, 6].

2.4.5 Materiais Super-duros

O emprego de materiais super-duros em ferramentas de furação ainda é restrito a casos especiais. O diamante policristalino (PCD) e o nitreto de boro cúbico policristalino

(PCBN) podem ser usados na furação na forma de pastilhas intercambiáveis revestidas montadas em uma broca. O PCBN é empregado na usinagem de materiais duros, mas a vida da ferramenta depende muito do material da peça. É possível a utilização de materiais super-duros como o diamante na ponta de brocas helicoidais para a furação de ligas de alumínio devido às características do material da peça. O tempo de vida da ferramenta neste caso supera em muito o tempo de vida de ferramentas convencionais [4].

2.5 Revestimentos de Ferramentas de Corte

O desempenho das ferramentas de corte mudou drasticamente no fim dos anos 60, quando se utilizou pela primeira vez uma camada de revestimento de nitreto de titânio (TiN) em uma ferramenta de corte [2, 39, 56, 62]. A vida das ferramentas de aço-rápido, metal-duro e Cermets aumentou muito com a aplicação de revestimentos [27]. Hoje em dia o setor metal-mecânico enfrenta novas exigências e desafios tecnológicos como a usinagem em alta velocidade, o desenvolvimento de novos materiais para peças e a usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido de corte. Isto tudo leva ao surgimento de novos materiais e revestimentos para ferramentas, procurando-se sempre aumentar o tempo de vida e a velocidade de corte das mesmas [4, 26, 40, 54, 58, 61, 63, 64].

As pesquisas e desenvolvimentos de ferramentas atualmente baseiam-se em três palavras: duro (material), seco e rápido (usinagem) [61]. As principais ferramentas revestidas são compostas por um substrato relativamente tenaz de metal-duro ou aço-rápido sobre o qual é aplicada uma fina camada de material resistente ao desgaste com granulometria extrafina (carbonetos, nitretos, carbonitretos e óxidos) [3, 5, 6].

De forma geral, a utilização de revestimentos conferem certas características às ferramentas de corte como [3, 4, 5, 6, 26, 27, 39, 40, 53, 54, 56, 57, 58, 60, 61]:

- Resistência ao calor e ao desgaste;
- Maior tempo de vida;
- Diminuição do choque térmico no substrato;
- Usinagem com velocidades de corte e avanço mais altos;
- Possibilidade de corte a seco ou com mínima quantidade de fluido de corte;
- Melhor acabamento superficial na peça;
- Redução do atrito;

- Redução e até mesmo ausência de gume postiço e;
- Redução do desgaste de cratera e de flanco.

A baixa condutividade térmica dos revestimentos serve como uma barreira entre o material da peça e o substrato da ferramenta [27]. Segundo Klocke et al. [53], devido a esta barreira a carga térmica no substrato, o atrito, a adesão, a difusão e a oxidação podem ser reduzidos e a resistência à abrasão aumentada.

2.5.1 Processos de Revestimento

Melhorias na adesão entre as diferentes camadas de revestimento levou a uma nova geração de ferramentas. Atualmente tem-se revestimentos simples, duplos, triplos e até com 10 camadas com espessura inferiores a $0,2 \mu\text{m}$ (Fig. 11). A espessura total pode variar entre 2 e $12 \mu\text{m}$ (um fio de cabelo humano tem $75 \mu\text{m}$ diâmetro) [2, 4, 39, 56].

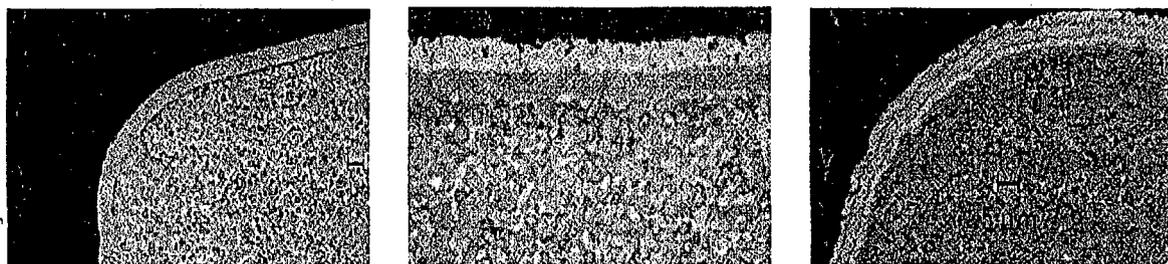


FIGURA 11 – Revestimento simples, duplo e múltiplo, respectivamente [2].

Os revestimentos são depositados principalmente através das técnicas de deposição química de vapor - CVD (*Chemical Vapour Deposition*) e deposição física de vapor - PVD (*Physical Vapour Deposition*), como também por processo físico-químico [2, 4, 27, 39, 53, 56, 57, 65, 66].

Deposição Química de Vapor – CVD: neste processo, como mostrado na figura 12, ocorrem reações químicas entre diferentes gases. Por exemplo, para se revestir com carboneto de titânio (TiC) combinam-se gases como o hidrogênio (H_2), cloreto de titânio ($TiCl_4$) e metano (CH_4). As ferramentas, neste caso pastilhas, são normalmente aquecidas a uma temperatura cerca de $1000^\circ C$ sob pressão abaixo da atmosférica [2, 3, 39, 56]. Pode-se depositar diferentes tipos de revestimentos em um mesmo equipamento para CVD, sendo o revestimento gerado geralmente uniforme e homogêneo com excelente adesão ao substrato [2, 3]. Entre os principais revestimentos para ferramentas de corte aplicados por CVD estão o TiC, TiN, TiCN, Al_2O_3 , AlON ou uma combinação entre eles [4, 39].

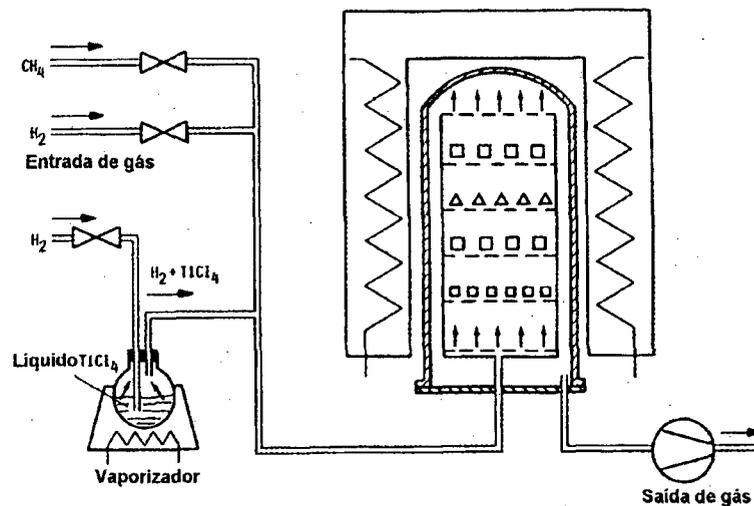


FIGURA 12 – Processo CVD [3].

Deposição Física de Vapor – PVD: o processo de revestimento por PVD (Fig. 13) é aplicado na maioria dos casos em ferramentas de aço-rápido e em alguns casos em metal-duro [2, 53]. A temperatura utilizada no PVD é aproximadamente $500^\circ C$, metade da temperatura do CVD [2, 39, 56, 62]. O PVD é indicado para ferramentas afiadas e com geometria complexa como brocas, fresas e insertos para rosqueamento. O processo baseia-se na remoção do material fonte de revestimento para um substrato através da vaporização ou bombardeamento.

Desde o início dos anos 80 revestimentos duros têm sido depositados através da técnica do PVD. Esta deposição pode ser feita através da eletro galvanização iônica com fonte de elétrons de baixa e alta potência, evaporação catódica por arco no vácuo, plasma e mais recentemente pulverização catódica por magnetron [2, 62, 65, 66]. No caso do revestimento de TiN, o titânio é ionizado por um feixe de elétrons (fonte de energia) formando um plasma que juntamente com nitrogênio reveste a ferramenta. Porém, existem muitas variações deste processo entre os fabricantes de ferramentas [5].

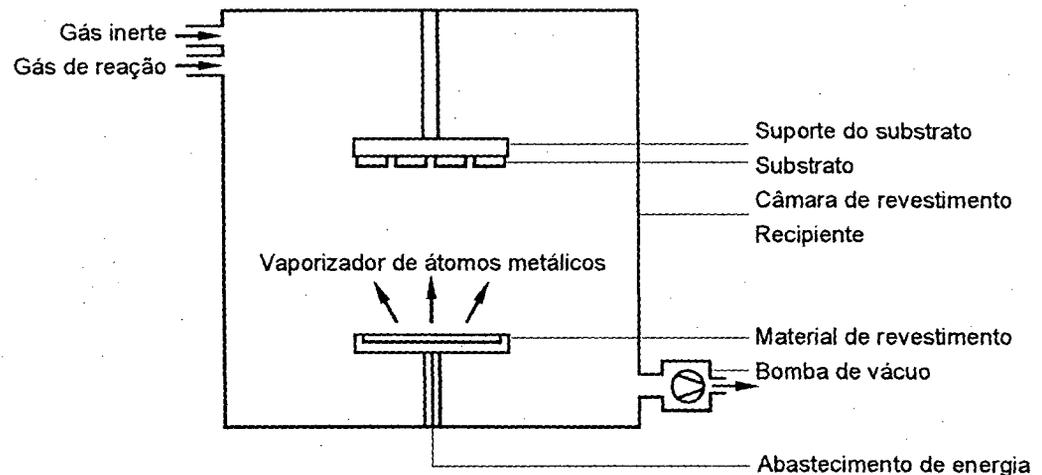


FIGURA 13 – Processo PVD [3].

Algumas vantagens do PVD sobre o CVD são [5, 27, 56]:

- Menor temperatura de trabalho e por conseqüência no substrato da ferramenta;
- Melhor adesão e acabamento superficial;
- Nenhuma ou mínima distorção presente no revestimento;
- Flexibilidade no controle da composição e morfologia;
- O revestimento é mais fino;
- A tenacidade do revestimento é melhor e;
- É um processo mais limpo.

2.5.2 Principais Tipos de Revestimento

Os principais materiais de revestimento de ferramentas são [2, 3, 5, 42, 43, 57, 58]:

- Carboneto de titânio (TiC);
- Nitreto de titânio (TiN);
- Óxido de alumínio (Al_2O_3);
- Carbonitreto de titânio (TiCN);
- Nitreto de titânio e alumínio (TiAlN) e;
- Bissulfeto de molibdênio (MoS_2).

Carboneto de titânio (TiC): os carbonetos de titânio são geralmente depositados por CVD [4]. Este se caracteriza por ser um material duro que fornece resistência ao desgaste por abrasão. Sendo quimicamente inerte, forma uma barreira térmica e química entre o cavaco e a ferramenta. Devido à diminuição do atrito e menor condutividade térmica há uma redução na temperatura no gume, diminuindo a difusão. Leva a forças de avanço e passivas menores, porém a força de corte é a mesma se comparada com uma ferramenta não-revestida. A espessura do revestimento varia entre 4 a 8 μm , possuindo coloração cinza escuro [2, 3, 6].

Nitreto de titânio (TiN): para Raymond [60] a economia e o aumento de produtividade alcançados com o revestimento de TiN têm se mostrado significativos, podendo em certos casos aumentar a vida da ferramenta em até 800%. Já segundo Subramanian et al. [27] e em testes realizados por fabricantes de ferramentas, na furação, a vida de uma broca de aço-rápido revestida com TiN pode superar em até quatro vezes a vida de uma broca do mesmo material não-revestida [25]. Isto faz com que as brocas revestidas com TiN sejam ferramentas adequadas para propósitos gerais, numa empresa onde se usina uma grande variedade de materiais [25, 26, 58].

O revestimento de TiN foi um dos primeiros a ser empregado e ainda hoje é o mais utilizado, sendo que cerca de 80% das ferramentas revestidas são de TiN [4, 25, 26, 57, 58, 60]. Os principais motivos do domínio do TiN no mercado segundo Cselle e Barimani [58] são:

- Tem bom desempenho em quase todas as aplicações e materiais usinados;
- Sua cor dourada dá uma impressão de alta qualidade e permite visualizar a evolução do desgaste mais facilmente e;
- Devido à sua demanda, seu preço é acessível.

O TiN facilita a saída do cavaco, diminui a temperatura gerada na remoção do material (suporta até 600°C), o desgaste abrasivo de flanco e a formação do gume postigo. O nitreto de titânio não é um material tão duro quanto o carboneto de titânio, porém apresenta um coeficiente de atrito baixo o que confere à ferramenta uma maior resistência ao desgaste de cratera. Possui uma alta energia de ligação interna, sendo assim mais estável quimicamente. As espessuras variam entre 5 e 7 μm , podendo em alguns casos chegar a 15 μm [2, 3, 6].

Óxido de alumínio (Al_2O_3): é geralmente aplicado por CVD sendo o mais frágil de todos os materiais duros. Age como uma barreira térmica apresentando elevada dureza a quente e resistência à oxidação [53]. Oferece excelente resistência ao desgaste de cratera, mas tem baixa resistência a oscilações de temperatura e a choques mecânicos. É um revestimento transparente [2, 3, 6, 53, 63]. Quando presente em revestimentos múltiplos, atua predominantemente quando se atingem velocidades de corte elevadas [64].

Carbonitreto de titânio (TiCN): este revestimento combina o baixo coeficiente de atrito do TiN com a dureza e capacidade de dissipação de calor do C [54]. A temperatura máxima suportada na região de corte é cerca de 450°C [68]. A espessura de revestimento com o TiCN chega a ser de 2 μm . Este tipo de revestimento fornece dureza e resistência ao desgaste excepcionais, superando o desempenho do TiN em aplicações onde o avanço e a velocidade de corte são severos. Isto ocorre na usinagem de materiais abrasivos ou de corte difícil. Pode-se usinar materiais como aço carbono, alumínio, aço inoxidável, aço para matrizes, aços ferramenta e materiais abrasivos como ferro fundido, bronze e ligas de silício-alumínio. Este elemento forma uma boa combinação com outro que forneça uma barreira térmica estável, como por exemplo o óxido de alumínio [2, 3, 6, 26, 62].

Carboneto de titânio e alumínio (TiAlN): este tipo de revestimento pertence ao grupo de materiais metálicos duros, onde o AlN está ligado a um metal-duro covalente. Dentre os revestimentos mais importantes como o TiN, TiCN e CrN é o que apresenta o melhor isolamento térmico [40, 58]. Devido à formação de uma camada superior densa de Al_2O_3 , aumenta a resistência à difusão e à oxidação como também a sua dureza até mesmo em temperaturas elevadas de até 800°C [67, 68].

É um dos revestimentos mais indicados para a usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido de corte [28]. Quando presente em múltiplas camadas, combina-se uma camada dura de TiAlN, com uma mole e lubrificante de WC/C a qual apresenta dureza média e baixo coeficiente de atrito. Esta combinação melhora a saída do cavaco (menor atrito) reduzindo a força de corte [3, 58]. Em brocas de aço-rápido e metal-duro, esta combinação apresentou-se adequada na usinagem de materiais de cavaco longo como aço-doce, aço inoxidável e ligas de alumínio. Utilizando estas ferramentas diminui-se as paradas de máquina para a troca de ferramenta, melhora-se a qualidade superficial e pode-se eliminar o uso de fluido de corte no processo [2, 3, 58].

Na furação com brocas de aço-rápido revestida com TiN e TiCN, o desempenho das mesmas foi superior ao da TiAlN. Entretanto, com brocas de metal-duro, o TiAlN mostrou-se superior. Isto deve-se ao fato do substrato de aço-rápido ser mais tenaz se comparado ao metal-duro e com isso a deformação do aço-rápido é maior o que induz a trincas no revestimento de TiAlN [58]. O uso do TiAlN é indicado na furação de materiais abrasivos como ferro fundido, ligas de Si e Al pois combina o baixo coeficiente de atrito do TiN com a resistência à oxidação do Al [2, 3, 58, 62].

Bissulfeto de molibdênio (MoS_2): é aplicado geralmente por PVD, sendo empregado na usinagem de alta velocidade a seco ou quase a seco de vários materiais. O MoS_2 , juntamente com outros 14 aditivos, reduz a 1/6 o atrito na usinagem quando comparado ao TiN. O MoS_2 pode ser usado com revestimentos duros como TiAlN e TiCN aumentando extremamente a vida da ferramenta na usinagem do aço-rápido e ligas de alumínio, resultando numa boa qualidade superficial [4, 54, 59]. Neste caso, o revestimento macio cobre o duro, agindo como uma barreira térmica entre o cavaco e a ferramenta prevenindo o sobreaquecimento. Segundo Cselle [59], que patenteou o MoS_2 como revestimento de

ferramentas com o nome comercial Movic®, combinando este com carbonetos pode-se concorrer com os Cermets a menor custo. O MoS_2 adere como o Teflon® na ferramenta, criando uma superfície de baixo atrito, mas também de baixa dureza. No caso das brocas vale salientar que o mesmo não recobre a ponta da ferramenta, desta maneira a broca fica mais afiada [58].

2.5.3 Novas Tendências para Revestimento

A criação de novos tipos de revestimentos e refinamento na forma de deposição de camadas múltiplas levará a grandes mudanças no que se refere à produtividade. Os revestimentos ordenados atômica e molecularmente formados por múltiplas camadas nanométricas levam à dureza e tenacidade superiores, aumentando o desempenho da ferramenta no que diz respeito ao atrito, desgaste e propriedades lubrificantes. É possível assim aumentar a resistência ao desgaste, a velocidade de corte e a vida das ferramentas [39, 56, 61]. A chave desta técnica está na diminuição do tamanho e quantidade de gotas de revestimento formadas durante a deposição. Sem a camada nanométrica, as gotas podem gerar uma superfície desnivelada, diminuir o poder de lubrificação ou o fator de deslizamento. A minimização de formação das gotas requer um sincronismo ultrapreciso entre o controle elétrico de ignição e a rotação da ferramenta na câmara de revestimento [39, 56, 61].

Uma técnica de revestimento promissora é a implantação de íons por plasma. Este processo aumenta a dureza da ferramenta sem modificá-la dimensionalmente, o que é essencial para ferramentas especiais [4].

Segundo Peyre e Duchateau [65], pesquisas têm sido feitas visando reduzir a temperatura do processo CVD para cerca de 500°C , onde já foi possível a aplicação do TiCN, ZrCN em temperaturas de 280 e 580°C , respectivamente.

2.6 Forças na Furação

As forças de usinagem que estão presentes no processo de furação são importantes para [1, 2, 3, 5, 41, 43, 55, 70]:

- O projeto, avaliação e desenvolvimento de máquinas-ferramenta;
- O entendimento dos fenômenos na região de corte e formação do cavaco;
- O monitoramento e entendimento de mecanismos de desgaste;

- A determinação da usinabilidade de um material;
- A determinação das condições de corte e;
- O conhecimento da energia gasta.

Os fatores mais importantes que influenciam nas forças de usinagem, são [1, 3, 4, 27, 47, 55]:

- Material da peça e ferramenta;
- Revestimento da ferramenta;
- Geometria da ferramenta;
- Condições de corte;
- Fluido de corte e;
- Desgaste da ferramenta.

As forças de usinagem (F) atuantes no gume principal durante a furação com brocas helicoidais podem ser divididas em três componentes listados abaixo e mostrados na figura 14 [3, 41, 47, 70]:

- Força de corte (F_c);
- Força de avanço (F_f) e;
- Força passiva (F_p).

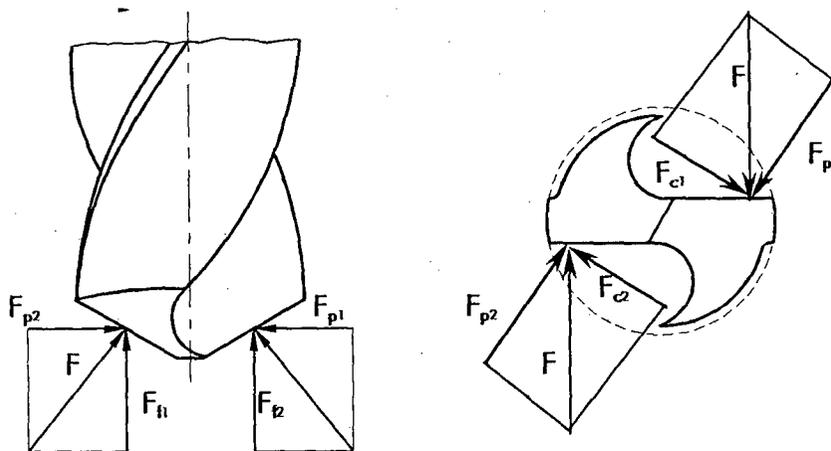


FIGURA 14 - Forças atuantes no gume principal [3].

Segundo Stemmer [47] existem 3 formas de resistência no processo de furação que surgem durante os movimentos de avanço e de rotação da broca:

- Esforço de corte do material nos dois gumes principais;
- Corte e esmagamento do material pelo gume transversal e;
- Atrito das guias da broca e dos cavacos nas paredes do furo, atrito do cavaco nos canais da broca e atrito dos flancos (superfícies de incidência) da broca sobre o fundo do furo.

A parcela de contribuição destes fatores pode ser quantificada conforme apresentado na tabela 3 a seguir:

TABELA 3 – Participação de cada fator nos esforços da furação [47].

Fatores	Força de Avanço F_f	Momento Torçor M_t
Gumes principais	40 a 50%	70 a 90%
Gume transversal	45 a 58%	3 a 10%
Atritos	2 a 5%	5 a 20%

Força de corte (F_c): a parcela da força de corte em cada gume cortante é decorrente da resistência ao corte do material usinado, tendo grande influência sobre o momento torçor que atua na furação. O atrito das guias da broca e dos cavacos na parede do furo também contribui para o aumento do momento torçor. Esta contribuição depende da qualidade da afiação e do fluido de corte utilizado [41]. A equação matemática para o cálculo da força de corte por gume na furação em cheio, ou seja, sem pré-furo, é a seguinte [47]:

$$F_c = k_c \times \frac{f \times D}{4} \quad [\text{N}] \quad (1)$$

Segundo Stemmer [47], pode-se também utilizar a equação matemática de Kienzle para a furação, que oferece resultados mais precisos pois considera a variação de k_c com a espessura de cavaco. A equação está mostrada em seguida [47]:

$$F_c = k_{c1,1} \times \frac{D}{2 \times \sin \frac{\sigma}{2}} \times \left(\frac{f}{2} \times \sin \frac{\sigma}{2} \right)^{1-m_c} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

Pode-se ainda calcular a força de corte a partir do momento [41]:

$$F_c = \frac{M_t}{380 \times D} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

Força de avanço (F_f): é resultante da soma das parcelas da força de avanço do gume de corte e da força de avanço do gume transversal. Como o gume transversal não efetua corte, a parcela da respectiva força de avanço pode ser igual ou até mesmo maior que a força de avanço dos gumes principais de corte. É importante conhecê-la para se ter certeza que o eixo da máquina é capaz de suportar a operação. Esta força também recebe pequena contribuição do atrito do cavaco nos canais da broca [2, 41]. Ainda segundo Stemmer [47], pode-se utilizar a equação (4) para o cálculo da força de avanço total:

$$F_f = k_a \times \frac{f \times D \times \sin \frac{\sigma}{2}}{2} \quad [\text{N}] \quad (4)$$

O k_a [N/mm^2] é a pressão específica de corte na direção normal ao gume, no plano de referência. Por aproximação, para brocas pode-se considerar k_a igual a k_c [47]. O valor de k_c e $k_{c1,1}$ depende principalmente do diâmetro da broca, avanço e material da peça. O ângulo de ponta, ângulo de hélice, fluido de corte e estado de afiação também influenciam k_c e $k_{c1,1}$, mas de forma secundária [1, 47].

Força passiva (F_p): atuante em uma parcela do gume principal, tem sentido oposto à força passiva atuante no outro gume. Presumindo-se que a geometria da ponta da broca tenha sido corretamente fabricada, a resultante é conseqüentemente nula. Ela é desprezível quando comparada com as forças de corte e as de avanço [46].

$$F_{p_1} + F_{p_2} = 0 \quad (5)$$

Momento torçor (M_t): Os gumes principais da ferramenta são responsáveis pelo momento torçor, contribuindo em 70 e 90% no valor do mesmo [47]. É possível medir o momento diretamente através do uso de dinamômetro na peça ou na ferramenta [1, 5, 27, 56, 70, 71, 72]. A equação matemática para calcular o momento torçor é [47]:

$$M_t = \frac{F_c \times D}{2000} = k_c \times \frac{f \times D^2}{8000} \quad [\text{N.m}] \quad (6)$$

Potência de corte (P_c): é resultante do produto entre o momento torçor e a velocidade angular da ferramenta [2]. Através do seu conhecimento é possível calcular a potência necessária na máquina para a realização da furação [2, 47]:

$$P_c = \frac{M_t \times 2 \times \Pi \times n}{60000} = \frac{M_t \times n}{9549} \quad [\text{kW}] \quad (7)$$

2.7 Fases da Furação

Segundo Tönshoff et al. [4], a furação possui três fases distintas durante a usinagem do material, as quais são:

Fase inicial e de centragem: é um momento importante para o posicionamento correto da broca e disposição do furo, tendo grande influência na qualidade do mesmo. A descentragem da broca leva a torque alternante e à flexão no corpo da ferramenta, sobrecarregando um dos gumes. Isto geralmente leva a um desgaste prematuro e à quebra da broca. Nesta fase há um aumento constante das forças e do torque.

Fase inicial de corte: esta fase começa quando os gumes de corte estão iniciando o processo pleno de corte. As quinas da broca neste momento estão sob cargas térmicas e mecânicas críticas.

Fase de ruptura: esta fase começa quando toda a ponta da broca penetra na peça após os gumes terem iniciado o corte. A deformação elástica do sistema neste momento é crítica, podendo haver uma sobrecarga nos gumes de corte. Como resultado tem-se desgaste excessivo e algumas vezes a quebra da ferramenta.

2.8 Desgaste de Ferramentas

O desgaste é um fenômeno que geralmente ocorre de forma rápida e pode ser definido como a perda de material da ferramenta de corte durante a usinagem, resultante da interação entre a ferramenta, material da peça e parâmetros de corte [5]. O gume da ferramenta se desgasta com maior intensidade na face e no flanco sendo que o desgaste depende da forma e duração da solicitação térmica, mecânica e química na região de corte [1, 2, 3, 5, 6, 55]. Na prática os desgastes mais medidos são o de flanco e o de cratera (na face), sendo utilizados como critérios de fim de vida de uma ferramenta de corte [3, 81].

A seleção correta do material e geometria da ferramenta, dos parâmetros de usinagem e a boa estabilidade do sistema máquina-peça-ferramenta podem minimizar o desgaste da ferramenta [2].

2.8.1 Mecanismos de Desgaste

Os diversos mecanismos de desgaste mostrados na figura 15, agem em geral simultaneamente de maneira que, tanto sua forma como efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si [3]. Considera-se atualmente como os principais mecanismos causadores de desgaste [1, 2, 3, 5, 6, 55]:

- Fadiga térmica e mecânica;
- Adesão ou cisalhamento;
- Difusão;
- Abrasão mecânica;
- Oxidação e;
- Desgaste químico.

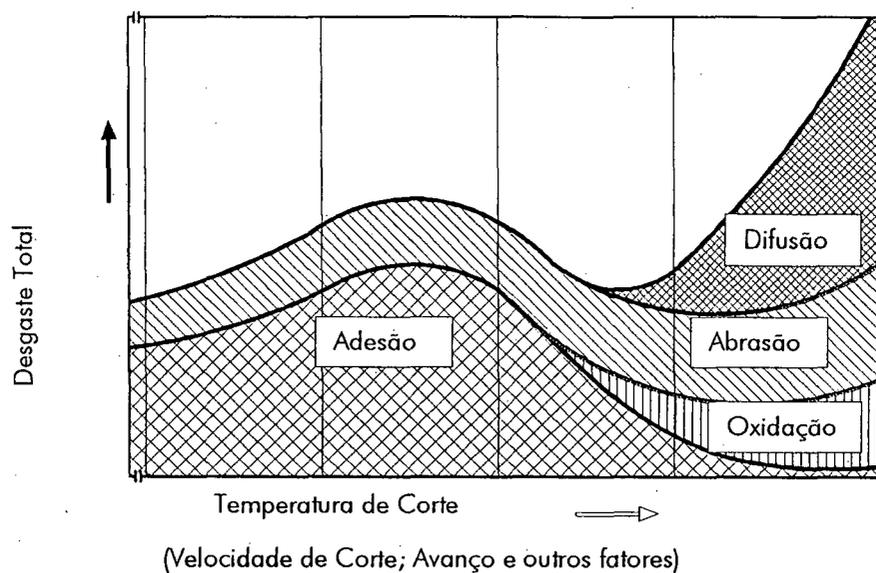


FIGURA 15 – Mecanismos de desgaste [3].

Fadiga térmica e mecânica: durante o corte do metal ocorre constantemente o aquecimento e resfriamento na região de corte, além de existir choques mecânicos no gume. A combinação destes fenômenos pode levar a fissuras, micro-lascamentos, deformação plástica e à ruptura da ferramenta. Alguns materiais para ferramentas de corte são mais sensíveis que outros a este mecanismo, onde a elevada dureza do material da peça, altas taxas de avanços e baixa dureza do material da ferramenta podem contribuir para o surgimento deste mecanismo [1, 2, 3, 5, 6].

Adesão e cisalhamento: este mecanismo ocorre quando duas superfícies estão em contato e são submetidas a alta pressão em uma certa faixa de temperatura. A pressão gerada depende do material da peça e da força existente na usinagem, a temperatura, por sua vez, é função da deformação plástica e do atrito na interface entre a peça e a ferramenta. Por estes dois fatores, partículas aderem à face da ferramenta apresentando alto grau de deformação a frio, estando encruadas, duras e resistentes. Após um certo tempo, estas partículas são cisalhadas levando consigo partículas da ferramenta, provocando desta forma desgastes na face e mais acentuadamente no flanco da ferramenta. Aços com elevada ductilidade são mais suscetíveis a gerar este mecanismo de desgaste [1, 2, 3, 5, 6, 55].

Difusão: as propriedades químicas do material da ferramenta e a afinidade deste com o material da peça dita o desenvolvimento da difusão. A difusão consiste na transferência de átomos de uma área de maior concentração atômica para outra de menor concentração. Este processo depende da temperatura na interface peça e ferramenta, da afinidade química dos materiais e do tempo de contato. Em ferramentas de aço-rápido a difusão não é significativa pois a temperatura em que ocorre a transferência atômica é muito maior que a de amolecimento da ferramenta. Já para as ferramentas de metal-duro na usinagem do aço em temperaturas na faixa de 700 a 1300°C a difusão tende a ocorrer (Fig. 16), formando geralmente uma cratera na face da ferramenta. O mecanismo de desgaste por difusão está baseado na [1, 2, 3, 5, 6, 55]:

- A difusão do ferro no cobalto;
- Difusão do cobalto no aço;
- Difusão do carbono no aço e;
- Dissolução do carboneto de tungstênio na liga cobalto-carboneto de tungstênio-ferro formando carbonetos mistos. Em consequência da menor resistência ao desgaste abrasivo destes últimos, a ferramenta sofre um desgaste acentuado onde estes se formam.

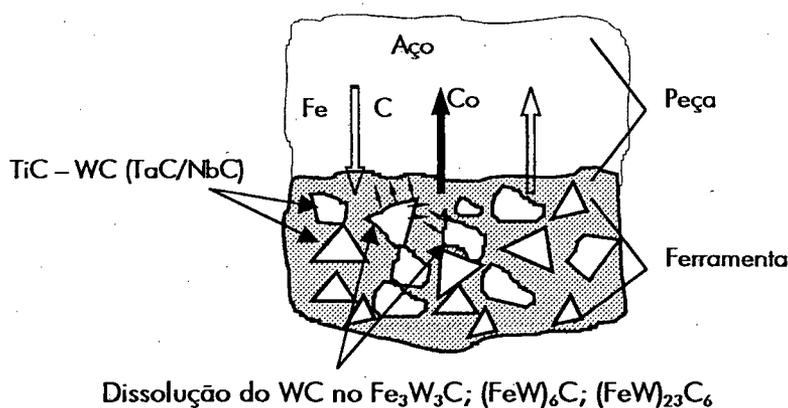


FIGURA 16 – Difusão [3].

Abrasão mecânica: a abrasão mecânica ocorre quando partículas duras na superfície do cavaco escorregam sob alta pressão e temperatura sobre a face da ferramenta, arrancando pequenas porções do material da ferramenta [5]. Estas partículas podem ser fragmentos provenientes do gume postiço ou inclusões como carbonetos e óxidos presentes no material

da peça [2, 3, 5, 6]. A resistência à abrasão depende da dureza do material da ferramenta [6].

Oxidação: a oxidação ocorre em temperaturas muito elevadas e na presença do ar. Para ferramentas de aço-rápido estas temperaturas são superiores à de amolecimento do material. Já para o metal-duro, esta temperatura está na faixa entre 700 e 800°C ou mais. Geralmente o desgaste por oxidação ocorre de forma significativa em um ponto que a estrutura da ferramenta já está enfraquecida [1, 2, 3, 5, 6].

Desgaste químico: o desgaste químico ocorre quando a ferramenta e a peça estão expostas a produtos químicos ativos, os quais freqüentemente estão presentes nos fluido de corte. É possível que o desgaste eletroquímico ocorra por ação galvânica. Acredita-se que o desgaste de cratera seja acentuado por uma ação termoquímica na face da ferramenta [5].

À medida que a ferramenta vai se desgastando, observam-se variações no processo de usinagem. A temperatura, a força de corte e a potência de usinagem aumentam, as dimensões da peça se alteram e o acabamento superficial piora. Em casos extremos, durante o corte ocorre um faiscamento e a superfície usinada torna-se áspera. Nas ferramentas de aço-rápido ocorre um sobreaquecimento do gume, amolecendo-o e tornando-o com aspecto de queimado. Além disso, súbita e simultaneamente ocorre um violento efeito de frenagem da ferramenta sobre a peça. Já em ferramentas de metal-duro, o aumento da força de corte, quando excessivo, leva a mesma ao lascamento e destruição total do gume [6].

2.8.2 Formas de Desgaste

Entende-se por forma de desgaste a maneira como este fenômeno se apresenta na ferramenta. Existem na literatura diversas maneiras de classificá-las. Pode-se, de uma maneira abrangente, classificá-las como descrito a seguir e mostrado na figura 17 [1, 2, 3, 5, 6, 55]:

- Lascamento;
- Fissuras transversais;

- Fissuras longitudinais;
- Deformação plástica;
- Desgaste de flanco;
- Desgaste de cratera;
- Desgaste por entalhe;
- Gume postiço e;
- Fratura.

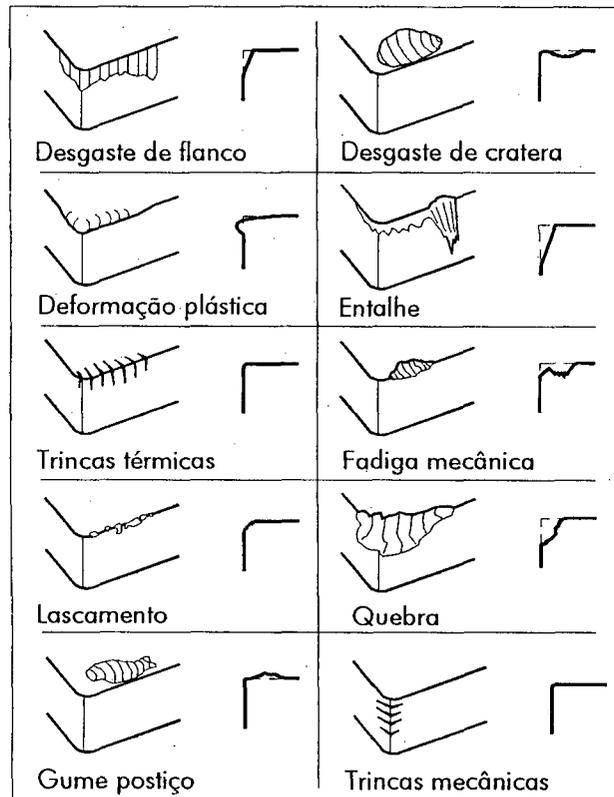


FIGURA 17 – Formas de desgaste [2].

Lascamento: o lascamento é uma falha acidental e prematura da ferramenta. Neste caso o gume da ferramenta quebra ao invés de desgastar-se gradualmente. Dentre os motivos que podem levar a ocorrer micro e macro-lascamentos na ferramenta estão as forças de corte excessivas, fragilidade do material da ferramenta, fadiga térmica e mecânica e ainda cortes intermitentes de materiais tenazes. As ferramentas cerâmicas e de metal-duro são mais suscetíveis a esta forma de desgaste [2, 3, 5, 6, 55].

Fissuras transversais (trincas mecânicas): as variações da força e vibrações levam a ferramenta de corte à fadiga mecânica, que acaba gerando as fissuras transversais. Estas fissuras são paralelas ao gume de corte (Fig. 18). Operações que têm o corte interrompido como o fresamento e a usinagem de materiais como o titânio provocam esforços alternantes levando à formação de fissuras transversais [1, 2, 3, 6].

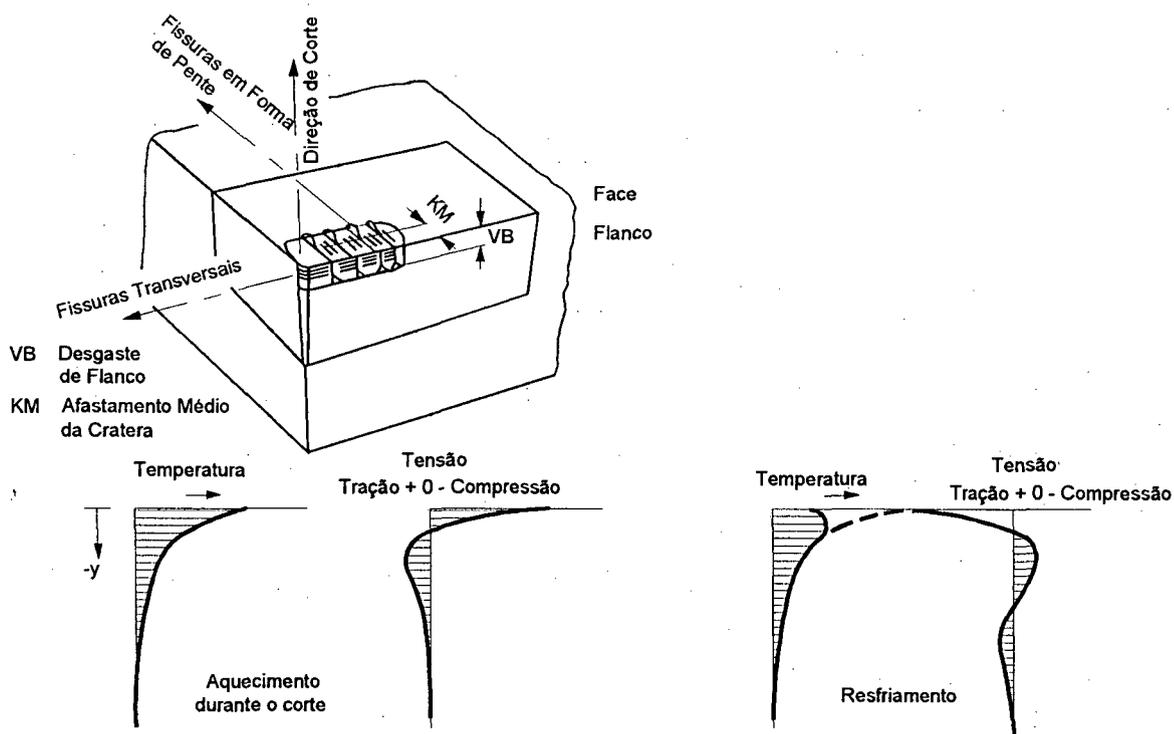


FIGURA 18 – Formação de fissuras transversais e longitudinais [3].

Fissuras longitudinais (trincas térmicas): as variações cíclicas na temperatura levam a ferramenta de corte à fadiga térmica e acabam gerando as fissuras longitudinais (Fig. 18). Segundo König [3], estas fissuras se apresentam na forma de pente e são perpendiculares ao gume da ferramenta. Operações com corte interrompido como o fresamento, onde o acesso do fluido de corte é irregular e usinagem com avanço variável geram este tipo de fissura como pode ser visto nas figuras 17 e 18 [1, 2, 3, 6, 55].

Deformação plástica: a deformação plástica ocorre quando o material da ferramenta não possui dureza a quente suficiente para suportar as pressões de usinagem e quando se usina

com avanço elevado. Esta forma de desgaste pode acontecer em ferramentas de metal-duro com alto teor de ligante em sua composição (Fig. 19) [3, 6, 55].

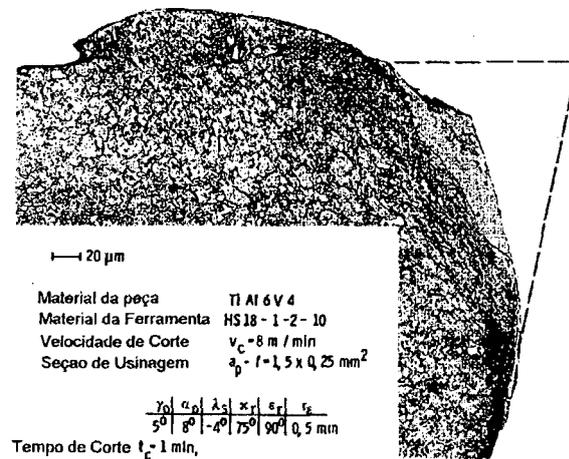


FIGURA 19 – Deformação plástica no gume de uma ferramenta de aço-rápido para torneamento [3].

Desgaste de flanco: o desgaste se dá no flanco da ferramenta logo abaixo do gume de corte, sendo causado principalmente pelo mecanismo de desgaste abrasivo. É normalmente o tipo mais comum de desgaste e o mais medido e monitorado nas operações de usinagem, podendo ser considerado como um dos critérios de fim de vida de uma ferramenta. Como consequência do mesmo, tem-se uma usinagem de baixa qualidade superficial, imprecisões e o aumento do atrito. As grandezas de desgaste a serem medidas estão representadas na figura 20, onde se distingue a marca de desgaste de flanco VB e $VB_{\text{máx}}$ e o deslocamento do gume em relação ao flanco da ferramenta SV_{α_r} , entre outros [1, 3, 5, 6, 81].

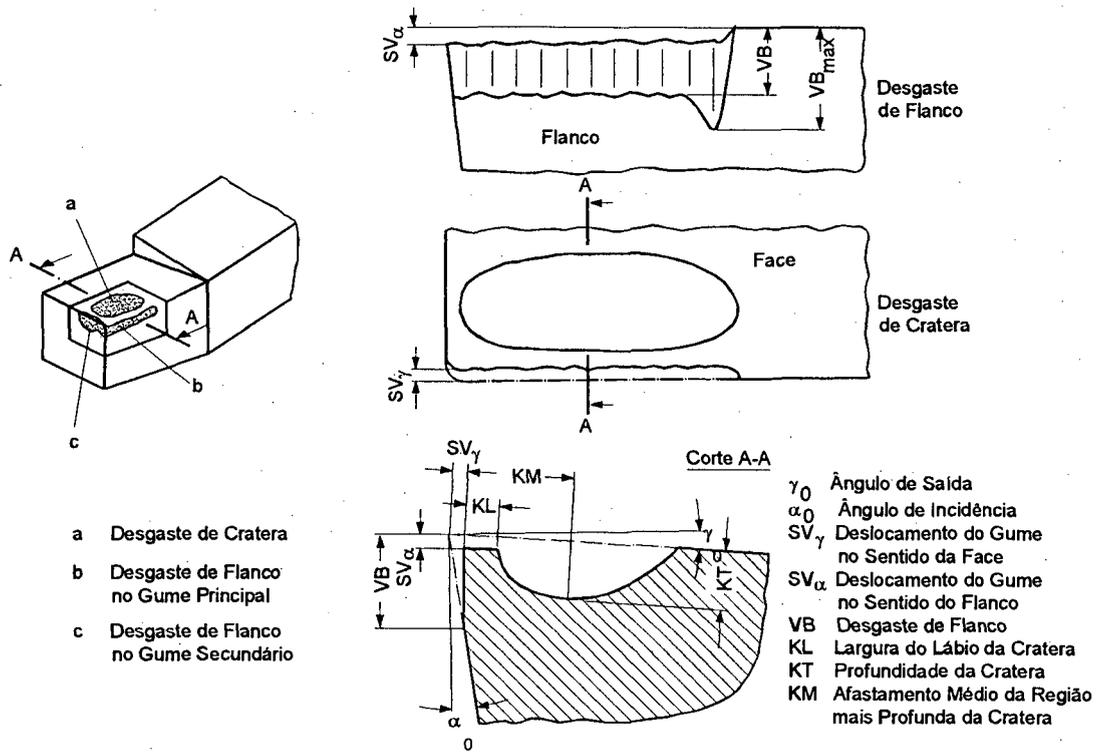


FIGURA 20 – Formas de desgaste e grandezas a serem medidas na cunha da ferramenta [3].

Desgaste de cratera: o desgaste de cratera, assim como o desgaste de flanco, é uma das formas mais freqüentes de desgaste e normalmente utilizada como critério de fim de vida de uma ferramenta. Ocorre principalmente devido aos mecanismos abrasivos e difusivos de desgaste. A cratera é formada pela remoção de material da ferramenta através da ação de partículas abrasivas duras combinada com a difusão entre cavaco e ferramenta. As grandezas de desgaste a serem medidas estão representadas na figura 20, onde se verifica a profundidade da concavidade que se forma na face KT e o afastamento médio da cratera em relação ao gume KM , dentre os quais pode ser determinada ainda a relação de desgaste $K=KT/KM$. Para minimizá-lo deve-se procurar ferramentas mais duras, com dureza a quente e com pouca afinidade com o material da peça [1, 2, 3, 5, 6, 55, 81].

Desgaste por entalhe: o desgaste por entalhe é um exemplo típico de desgaste causado por abrasão podendo ser também causado por oxidação ou ainda pela combinação de ambos. Está bem localizado na região final de contato entre o gume e a seção de cavaco, onde o ar

está presente. Esta forma de desgaste afeta a qualidade superficial no acabamento e enfraquece o gume de corte [2].

Gume postiço: a formação do gume postiço é decorrente da aderência de material proveniente da peça altamente encruado na face da ferramenta. Este fenômeno está relacionado a uma determinada faixa de velocidade de corte e temperatura, podendo ser evitado quando se trabalha fora desta faixa crítica. A textura superficial, que consiste nas mais finas irregularidades que normalmente resultam do processo de fabricação, é a primeira a ser afetada pelo gume postiço. Isto ocorre pois o mesmo acaba atuando no corte da peça; além disso pode acontecer o lascamento do gume e até mesmo o colapso súbito da ferramenta [2, 3, 5, 41]. Segundo Subramanian et al. [27] nas brocas este é um fenômeno randômico onde o tamanho, forma e regiões de deposição do material mudam constantemente.

Fatura: a fratura é o fim catastrófico da ferramenta devido às mudanças geométricas, o enfraquecimento do gume, o aumento da temperatura e das forças de corte. É o estágio final da evolução das outras formas de desgaste devendo ser evitado, tanto quanto for possível [2].

2.8.3 Desgaste em Brocas Helicoidais

No caso das brocas helicoidais o desgaste pode se apresentar além da face e flanco, no gume transversal, na quina e nas guias laterais como pode ser observado na figura 21 [27, 43, 44, 70, 71].

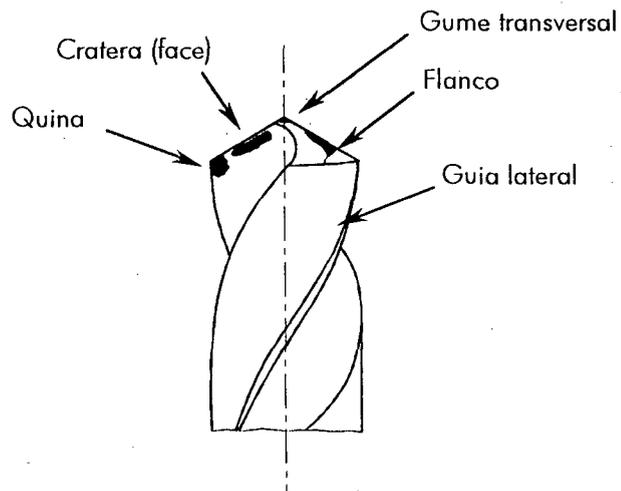


FIGURA 21 – Desgaste na broca helicoidal [43].

Segundo Kanai et. al. [44], existem sete tipos de desgaste em brocas, que são (Fig. 22):

- Desgaste de quina, W ;
- Desgaste de flanco no ponto médio, VB' ;
- Desgaste de flanco máximo, VB ;
- Desgaste da guia lateral, M_w ;
- Desgaste de cratera, K_m ;
- Desgaste no gume transversal medido em relação ao gume de corte (altura), C_i e;
- Desgaste no gume transversal medido em relação ao gume de corte (largura), C_m .

Pode-se ainda medir a altura (P_i) e largura (P_m) do lascamento dos gumes de corte.

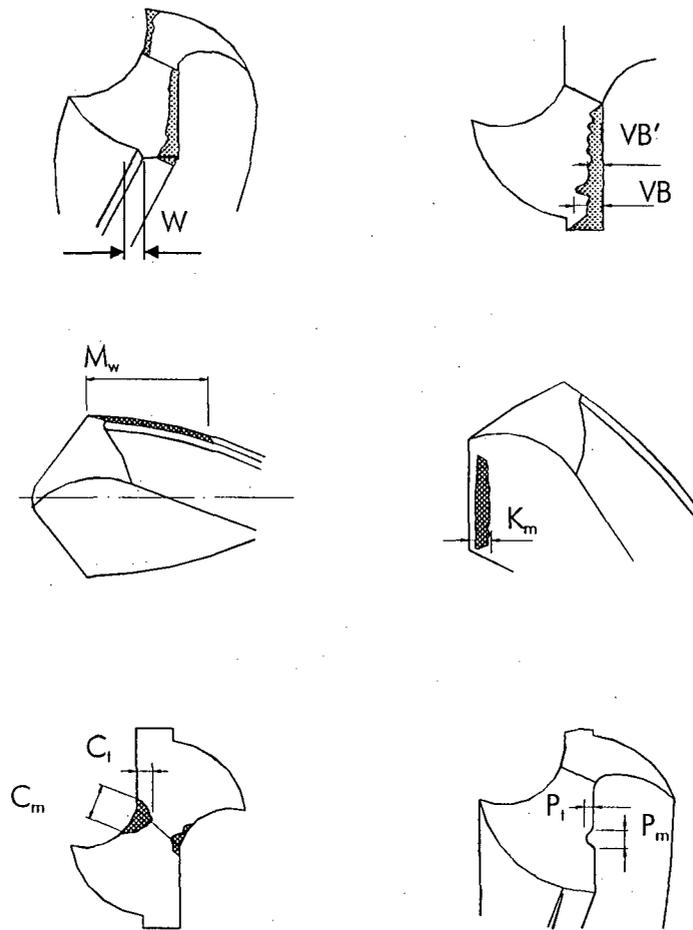


FIGURA 22 – Vários tipos de desgaste em brocas [44].

Existem diferentes mecanismos que podem originar o desgaste nos gumes de uma broca e a evolução do mesmo se dá de forma semelhante nesta parte da ferramenta. Já a evolução do desgaste na quina e na guia lateral apresenta uma diferença significativa entre os pares. Isto deve-se à excentricidade da broca, diferença na altura dos gumes e imprecisão geométrica da ferramenta gerando uma instabilidade no processo de furação. Recomenda-se a medição do desgaste de quina para a determinação do desempenho de brocas devido à facilidade de medição [44, 73].

Brinksmeier [43], em seus experimentos, constatou que o desgaste de guia pode 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 causa vibrações

e trepidações no processo de corte podendo levar à quebra catastrófica da ferramenta [27, 43].

2.9 Critérios de Fim de Vida

Define-se vida da ferramenta como sendo o tempo produtivo disponível durante o qual o gume irá usinar componentes aceitáveis dentro de parâmetros limitantes [1, 2, 3]. Há algum tempo considerava-se como fator limitante o estado em que a ferramenta não podia cortar mais. Atualmente considera-se a textura superficial, a exatidão dimensional e geométrica, o estado da ferramenta, a formação do cavaco e a vida restante da ferramenta. A vida da ferramenta está no limite quando se perde o controle sobre os cavacos formados ou quando o desgaste se desenvolve atingindo um estágio onde o risco de uma quebra rápida do gume é iminente [2].

Existe a possibilidade de se fazer testes de longa e de curta duração para a determinação da vida de uma ferramenta. Os de longa duração são mais precisos, porém são mais morosos e consomem mais recursos materiais e financeiros. Já os de curta duração servem apenas para fornecer parâmetros comparativos, sendo de execução rápida, econômica e fácil [3].

A fixação do ponto representativo do fim de vida de uma ferramenta é fundamental no estudo da usinabilidade. Na prática e nos ensaios de laboratório são utilizados diversos critérios, que determinam com maior ou menor grau de exatidão este ponto. A escolha do critério depende de vários fatores, tais como exigências da usinagem, material da ferramenta, etc., sendo os mais comuns [1, 2, 3, 5, 6, 43, 70, 71, 73]:

- Falha completa da ferramenta;
- Falha preliminar da ferramenta;
- Largura da marca de desgaste no flanco;
- Vibrações intensas da peça ou ferramenta, ruídos fortes por vibrações na máquina;
- Profundidade da cratera KT;
- Deficiência no acabamento superficial;
- Formação de rebarbas;
- Forma dos cavacos;

- Alteração dimensional da peça;
- Alteração da força de corte, torque ou potência;
- Aumento da força de avanço;
- Aumento da temperatura do gume e;
- Temperatura.

Já na prática, utiliza-se [3, 5, 6, 43, 70]:

- Tempo de máquina;
- Tempo efetivo de corte;
- Volume do metal removido;
- Número de peças usinadas;
- Velocidade de corte equivalente e;
- Velocidade de corte relativa.

Tempo de máquina: é o tempo em que a ferramenta fica na máquina cortando intermitentemente, antes de uma afiação. Indicado para máquinas automáticas.

Tempo efetivo de corte: é o tempo em que a ferramenta pode cortar efetivamente. É um dos critérios mais usuais.

Volume de material removido: é o volume de material removido durante reafiações sucessivas. O mesmo pode ser calculado a partir dos parâmetros de corte.

Número de peças usinadas: na produção seriada é um critério bastante utilizado. Na furação pode-se empregar o critério número de furos produzidos e comprimento de usinagem como critério de fim de vida.

Velocidade de corte equivalente: conhecida por velocidade de Taylor. É a velocidade de corte que, para uma determinada combinação de parâmetros de usinagem, permite obter um tempo efetivo de corte pré-determinado. Ex.: v_{60} é a velocidade na qual a vida efetiva da ferramenta é de 60 minutos.

Velocidade de corte relativa: é uma modificação da velocidade de corte equivalente, para uso geral na prática. É a velocidade de corte em termos percentuais quando se usina um determinado material, tendo como referência um material padrão. Geralmente atribui-se ao material padrão, normalmente o aço ABNT B 1112 o valor 100.

2.10 Qualidade do Processo de Furação

A qualidade dos furos é usualmente medida em função de erros geométricos e dimensionais, posicionamento, circularidade, forma e presença de rebarbas. As peças são desenhadas durante a fase de projeto trazendo as dimensões necessárias e outras propriedades como circularidade, retilineidade e precisão angular já estabelecidas. Como durante a fabricação na maior parte das vezes não se chega às dimensões exatas, devem ser especificadas as tolerâncias e os desvios permitidos sem que haja um comprometimento funcional da peça [2, 69]. Quanto mais estreita for a faixa de tolerância, maiores são os custos de usinagem e de inspeção [2, 5].

A precisão resultante dos furos depende do tipo de processo de furação, da peça, da ferramenta, da máquina, dos parâmetros do processo e rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça. Além disso, o grau de afiação e geometria da ponta da broca também influenciam fortemente a precisão do furo [5]. A precisão média do processo de furação é mostrada na tabela 4:

TABELA 4 – Precisão média de furos produzidos com brocas helicoidais [5].

Condição	DIÂMETRO [mm]					
	(3-6)		(6-19)		(19-38)	
	Tamanho [mm]	Posição [mm]	Tamanho [mm]	Posição [mm]	Tamanho [mm]	Posição [mm]
Sem furo de centro e sem bucha	0,08	60,18	0,15	60,20	0,20	60,23
Com furo de centro e sem bucha	0,08	60,10	0,08	60,10	0,10	60,13
Com bucha	0,05	60,05	0,08	60,05	0,10	60,08

Existem métodos específicos para se obter tolerâncias estreitas na furação com brocas helicoidais. Pode-se por exemplo utilizar brocas com geometria de ponta especial e executar um furo inicial (não o furo de centro) que tenha profundidade suficiente para uma certa penetração da broca no momento do corte propriamente dito.

2.10.1 Erros Comuns na Geometria do Furo

Devido às condições do processo de furação, certos erros e imperfeições podem acontecer, como apresenta a figura 23 [2, 3, 5, 41, 69]:

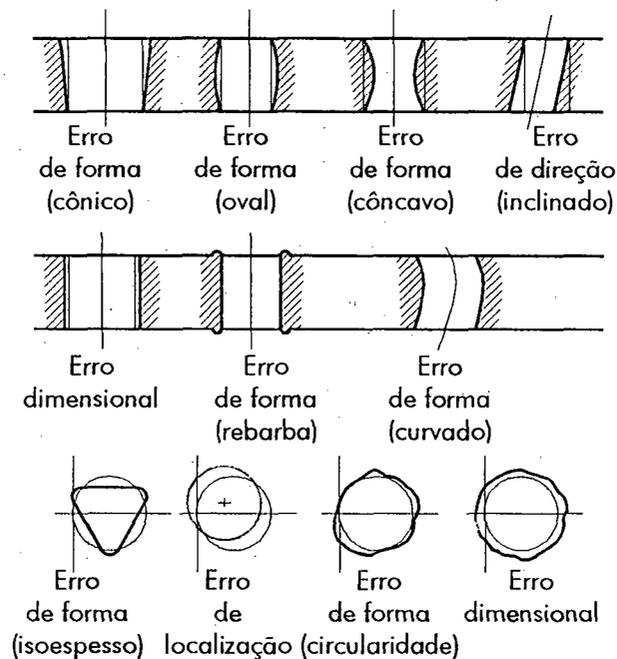


FIGURA 23 – Erros geométricos e dimensionais usuais na furação [2, 3, 5, 41, 69, 89, 90].

Erros de forma: ocorre quando o diâmetro do furo não é uniforme na profundidade do mesmo. Este tipo de erro se subdivide em erros de retilineidade, de planicidade, de circularidade, de forma de contorno e de superfície (rebarba). A intensidade do erro depende do diâmetro e da relação profundidade/diâmetro (p/d) da broca.

Erro de localização: quando o centro do furo não está onde deveria tem-se este tipo de erro. As condições da máquina, ferramenta e pontos de corte exercem influência sobre este tipo

de erro. O mesmo pode ser subdividido em erro de posição, de simetria e de concentricidade.

Erro de direção: este tipo de erro está presente quando a posição relativa entre dois ou mais elementos apresenta desvios no paralelismo, ortogonalidade e inclinação entre os mesmos.

Erro de dimensional: na maioria das vezes o diâmetro do furo é maior que o da broca. Estes valores estão mostrados na tabela 4.

2.10.2 Qualidade Superficial na Furação

Textura Superficial

Define-se a rugosidade com sendo as mais finas irregularidades que normalmente resultam do processo de fabricação. Estas incluem marcas transversais de avanço e outras irregularidades dentro do limites do comprimento de amostragem [5]. Alguns dos principais parâmetros utilizados na caracterização e medição da textura superficial são [1, 3, 5, 55, 74]:

Rugosidade R_z : conhecido como a profundidade máxima de rugosidade, é o valor do afastamento do perfil de base ao de referência, sendo a maior distância medida normalmente ao perfil geométrico ideal.

Rugosidade R_a : é a média aritmética do valor absoluto da distância “y” da linha média ao perfil de rugosidade dentro do comprimento amostral total l_m . Segundo as normas ISO é o principal parâmetro de caracterização da rugosidade, sendo utilizado nas normas internacionais e em empresas de cooperação internacional.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad [\mu\text{m}] \quad (8)$$

Rugosidade R_z : é a profundidade média da rugosidade. Consiste na média aritmética do desvio médio aritmético ou valor médio de rugosidade. É a média aritmética do valor absoluto da distância “y” da linha média ao perfil de rugosidade dentro do comprimento amostral total l_m .

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i \quad [\mu\text{m}] \quad (9)$$

Rugosidade $R_{m\acute{a}x}$: é a distância total entre o ponto mais alto e o mais baixo do perfil filtrado dentro do comprimento amostral total l_m .

O valor da rugosidade R_a na furação geralmente está compreendido entre 2,54 - 6,35 μm podendo em certos casos exceder esta faixa. Devido às muitas variáveis envolvidas no processo, é difícil prever o acabamento superficial nas muitas variações do processo de furação [5]. O acabamento dos furos deve ser feito por outros processos como brunimento, retificação, mandrilamento e alargamento [3, 5, 47].

Integridade Superficial

A furação afeta muito pouco as propriedades físicas do material da peça. Existe porém a presença de tensões residuais em uma pequena camada de material ao redor do furo que é removida em processos subseqüentes de usinagem [5].

2.11 Meios Lubri-refrigerantes

Os meios lubri-refrigerantes são também conhecidos como fluidos de corte, óleos de corte, meios de lubrificação e arrefecimento e líquidos refrigerantes [6]. Os meios lubri-refrigerantes foram desenvolvidos e aplicados na usinagem para reduzir custos, melhorar a qualidade da peça e têm sido usados por cerca de 200 anos. W. H. Northcott foi provavelmente o primeiro escrever sobre os benefícios da aplicação deste produto no seu livro "A Treatise on Lathes and Turning" em 1868 [5]. Algum tempo depois, em 1894, F. W. Taylor, através da aplicação de uma grande quantidade de água na interface peça e ferramenta aumentou a velocidade de corte em 30-40% [1, 5, 6].

O emprego de meios lubri-refrigerantes tem por objetivo aumentar a vida da ferramenta, aumentar a eficiência de remoção de material, melhorar o acabamento superficial, reduzir as deformações térmicas da peça e reduzir a força e potência de corte [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8].

As funções básicas dos fluidos de corte são [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8]:

- Refrigeração e lubrificação da peça e ferramenta;
- Transporte dos cavacos da região de corte e;
- Evitar a formação do gume postiço.

Além de atender às funções e objetivos citados acima, os fluidos de corte devem apresentar algumas características importantes [4, 5, 6]:

- Gerar poucos gases e névoas;
- Manter um odor tolerável;
- Manter a estabilidade durante o uso;
- Não atacar a peça;
- Não atacar a pintura da máquina-ferramenta;
- Ser compatível com o sistema de filtragem;
- Não afetar a saúde e;
- Ser resistente à ação de bactérias e fungos.

2.11.1 Estratégias de Aplicação dos Meios Lubri-refrigerantes

A forma de aplicação influencia muito o desempenho do meio lubri-refrigerante na processo de corte, até mesmo o melhor produto não tem um bom desempenho se não alcançar efetivamente a região de corte [5, 6]. Existem diferentes formas de aplicação destes produtos as quais dependem de diversos fatores relacionados com a máquina, a ferramenta, a peça e o processo. Dentre as estratégias de aplicação mais utilizadas destacam-se as seguintes [1, 2, 3, 5, 6]:

Aplicação manual em pequenos trabalhos: os fluidos de corte, pastas e lubrificantes sólidos podem ser aplicados desta forma em tarefas pequenas ou particulares. É a maneira mais simples e econômica de aplicação, porém não é tão eficiente.

Inundação ou aplicação em jatos: é um dos métodos de aplicação mais difundidos pois permite um fluxo contínuo do fluido na região de corte e a remoção eficiente dos cavacos.

Aplicação em névoa: neste caso o fluido é transportado através de um jato de ar, formando assim uma névoa. É indicado quando a velocidade de corte é alta e a área de corte é

Inundação ou aplicação em jatos: é um dos métodos de aplicação mais difundidos pois permite um fluxo contínuo do fluido na região de corte e a remoção eficiente dos cavacos.

Aplicação em névoa: neste caso o fluido é transportado através de um jato de ar, formando assim uma névoa. É indicado quando a velocidade de corte é alta e a área de corte é pequena. A vida da ferramenta, neste caso, pode ser maior do que na usinagem a seco. A boa visibilidade do processo e o acesso do fluido nas regiões onde por meio de outra técnica seria impraticável são algumas das vantagens da aplicação por névoa. As desvantagens são a possibilidade de inalação do fluido pelos operadores e outros funcionários, a necessidade de se utilizar equipamentos para aspersão e ventilação e a obstrução do bico injetor.

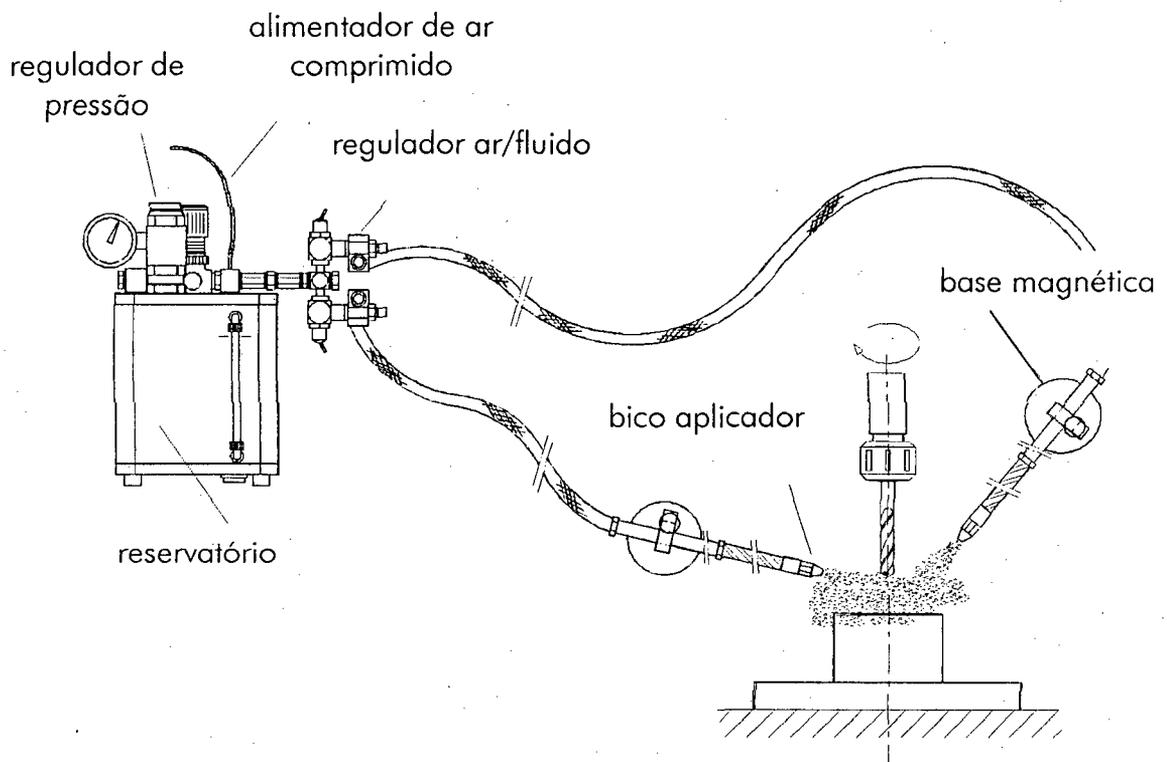


FIGURA 24 – Sistema atomizador para aplicação de fluido de corte em névoa.

Métodos especiais: em certas aplicações os fluidos de corte resfriados e gás engarrafado sob alta pressão mostram ser eficientes no aumento da vida da ferramenta.

produção [5, 7]. Para Stemmer [6], a seleção do fluido de corte pode ser feita em função do processo de usinagem, material da peça, material da ferramenta e tipo de máquina. Na seleção dos meios lubri-refrigerantes pode-se ter como objetivo [3, 5, 6]:

- Aumentar a transferência de calor;
- Melhorar a lubrificação;
- Melhorar a remoção dos cavacos;
- Reduzir a formação de névoa;
- Inibir a corrosão;
- Redução da quantidade de fluido nos cavacos e a;
- Estabilização do fluido.

Outra forma de seleção baseia-se na redução dos custos procurando assim [3, 5, 6]:

- Reduzir o impacto ambiental e;
- Reduzir os danos à saúde dos operadores.

Normalmente procura-se empregar um fluido com melhor capacidade de lubrificação na usinagem com baixa velocidade, na usinagem de materiais de corte difícil, em operações complexas e quando se procura melhorar a qualidade superficial da peça. Já fluidos com boa capacidade de refrigeração são indicados na usinagem em alta velocidade, na usinagem de materiais de corte fácil, em operações simples e quando se tem problemas com a formação de gume postiço [2, 3, 5, 6].

2.11.3 Tipos de Meios Lubri-refrigerantes

Pode-se classificar basicamente os meios lubri-refrigerantes em quatro grupos distintos [1, 3, 5, 6, 7, 8, 13]:

Miscíveis com água: dentre os mais utilizados estão as emulsões erroneamente também conhecidas por "óleos solúveis", representando aproximadamente 40% do total consumido no mercado. Consistem basicamente em gotas de óleo suspensas uniformemente na água formando uma mistura de grandes volumes de água, óleo e agentes emulsificantes. Predomina durante sua aplicação a capacidade refrigerante da água, podendo melhorar a capacidade de lubrificação através da introdução de aditivos polares e de extrema pressão.

Dentro deste grupo estão também as soluções aquosas ou fluidos sintéticos, porém têm consumo pouco significativo.

Não-miscíveis com água: são chamados também de óleos de corte representando 60% dos produtos lubri-refrigerantes consumidos. Estão neste grupo os óleos minerais puros, óleos graxos (mineral ou vegetal), óleos com aditivo polares e com aditivos de extrema pressão.

Gases e névoas: o argônio, o hélio, o nitrogênio e o dióxido de carbono são empregados como fluido de corte pois previnem a oxidação da peça e do cavaco. Os custos destes produtos são muito elevados, sendo aplicados somente em casos especiais. O ar também pode ser considerado como um meio lubri-refrigerante pois está presente até mesmo na usinagem a seco, pode ser aplicado na forma de ar comprimido, facilitando a retirada de calor e a expulsão do cavaco da zona de corte. Existem óleos que podem ser utilizados na forma de névoa, sendo esta formada por uma mistura de ar mais meio lubri-refrigerante.

Sólidos: o bissulfeto de molibdênio (MoS_2), conhecido comercialmente por Molikote®, apresenta boa característica de lubrificação em condições de extrema pressão. Uma leve aplicação na superfície do gume da ferramenta com a pasta de MoS_2 é suficiente para melhorar o processo de usinagem. O grafite também é empregado como meio lubrificante em certos casos.

2.11.4 Problemas Relacionados com o Uso dos Meios Lubri-refrigerantes

Existem várias partes envolvidas (fornecedores, órgãos de controle, associações de trabalhadores, acadêmicos, etc.) em questões como a saúde dos operadores, segurança na utilização e no descarte dos meios lubri-refrigerantes. Cada uma delas têm um interesse específico, sendo que desta maneira não existe uma opinião comum formada sobre o assunto [5, 21].

Mesmo assim, é de conhecimento de todos que a aplicação, manutenção e transporte dos fluidos de corte exigem cuidados especiais, pois se feita de forma errônea pode prejudicar os equipamentos, a saúde dos operadores e agredir o meio ambiente

através da contaminação do ar, solo e água [1, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

Problemas técnicos: os efeitos negativos possíveis de acontecer na interação máquina-ferramenta e fluido de corte são os seguintes [15, 19]:

- Falha do comando numérico;
- Corrosão em furos profundos;
- Emperramento de interruptores e partes móveis;
- Corrosão de elementos não-metálicos da máquina-ferramenta;
- Degradação de componentes poliméricos da máquina-ferramenta e;
- Amolecimento e descascamento da pintura da máquina-ferramenta.

Da interação entre os óleos da máquina-ferramenta e o fluido de corte pode ocorrer a desestabilização da emulsão, e como consequência tem-se a presença de odores, formação de resíduos insolúveis, perda das propriedades lubrificantes e a formação de névoa e espuma [1, 6, 19].

Problemas à saúde: nos últimos anos a consciência dos trabalhadores a respeito de assuntos relacionados com a saúde e segurança no ambiente de trabalho tem aumentado muito. Nos Estados Unidos, doenças e desordens de pele são responsáveis por 40% de todas as doenças ocupacionais, representando um gasto de um bilhão de dólares em indenizações [5, 17]. Estima-se que somente nos Estados Unidos, 780.000 pessoas estão expostas diretamente aos fluidos de corte no ambiente de trabalho [5]. Segundo Lapidés [17], este número pode chegar a dois milhões de pessoas. Considerando-se o número de trabalhadores expostos diariamente apenas às névoas formadas por tais produtos este número chega à ordem de 1.000.000, levando-se em conta as indústrias de grande e pequeno portes [14].

Os problemas associados à saúde a curto e longo prazo mais comuns são [1, 5, 6, 8, 18, 20, 21, 22, 23]:

- Problemas de pele (dermatite, sensibilização, hiperpigmentação, irritações e erupções);

- Câncer (de pele, estômago, fígado, esôfago, reto, fígado, laringe, cérebro, pulmão, cólon, pâncreas e leucemia);
- Danos respiratórios (asma, bronquite, pneumonia e redução da capacidade respiratória).

Os fluidos sintéticos são os principais responsáveis pela dermatite em operadores de máquina. É difícil identificar um irritante específico, que pode ser um aditivo como um biocida ou anti-corrosivo, a base do óleo de corte, uma combinação dos componentes ou os produtos formados pela sua degradação. Além disso, a lavagem excessiva ou de forma agressiva das mãos pré-dispõe o operador a este tipo de problema [23].

Existem várias maneiras possíveis de absorção destes produtos pelo corpo humano como [5]:

- Através da pele e derme (contato cutâneo e subcutâneo);
- Ingestão oral;
- Inalação pelas vias aéreas e;
- Através dos olhos.

Estes produtos podem afetar não somente os usuários diretos, como também seus descendentes no futuro [21].

Problemas ambientais: o meio ambiente, através da contaminação da água, solo e ar, é inevitavelmente agredido pelos fluidos de corte e seus subprodutos. Isto pode ocorrer durante as fases de utilização, manutenção e descarte dos mesmos. Durante o ciclo de vida destes produtos há a possibilidade de contaminação através do descarte dos resíduos, das perdas no processo, da vaporização durante o uso e das águas de lavagem. Não existe ainda uma forma perfeita de reciclagem dos resíduos gerados pelo uso dos meios lubri-refrigerantes [8, 18]. O desenvolvimento e a utilização de óleos de base vegetal e animal não-agressivos ao meio ambiente têm se mostrado promissores principalmente na indústria automobilística e de autopeças. Este fato deve-se às normas QS9000 e ISO14001 [10, 12].

2.12 Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte (MQFC)

A globalização econômica está impondo limites e determinações à sobrevivência de empresas, grandes ou pequenas, face à questão ambiental e à conseqüente necessidade de conhecer e reavaliar, sob novo ponto de vista, as diferentes atividades econômicas e, mais que isso, todo o ciclo de vida dos seus produtos e serviços. Nos últimos anos a pressão e exigência dos órgãos ambientais, das leis governamentais, da sociedade e do próprio mercado internacional (série ISO14000) tem-se tornado cada vez maior, visando a redução do impacto ambiental promovido por resíduos dos diversos setores produtivos, dentre os quais o metal-mecânico. Como conseqüência, a usinagem a seco, a usinagem com mínima quantidade de fluido de corte e a utilização de produtos não-agressivos à natureza (biodegradáveis) têm-se mostrado como uma forte alternativa para os processos de fabricação [8, 9, 10, 18, 20, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 36, 37, 38, 42, 77, 80].

O significado ecológico e econômico dos fluidos de corte torna-se claro quando se considera o consumo anual destes produtos no mundo, como mostram as figuras 25 e 26, principalmente na Alemanha e Estados Unidos [9, 76].

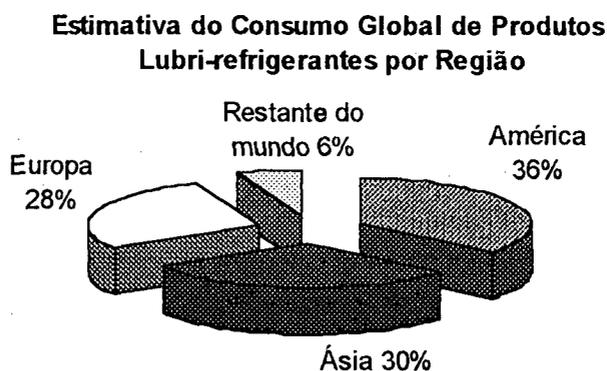


FIGURA 25 – Consumo global por região dos produtos lubri-refrigerantes [76].

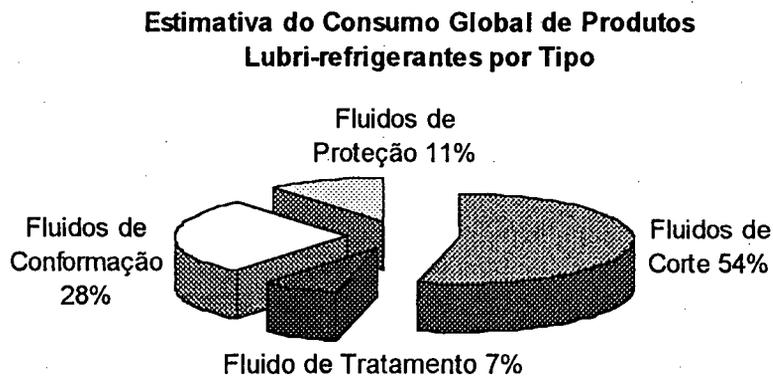


FIGURA 26 – Consumo global por tipo dos produtos lubri-refrigerantes [76].

Somente nos Estados Unidos, a utilização dos fluidos no setor metal-mecânico representa um negócio de aproximadamente 660 milhões de litros, avaliado em 800 milhões de dólares/ano, representando 15% das vendas de óleos industriais. Em nível global, estima-se que chega a 2,25 bilhões de litros [76].

Conforme dados do Ministério da Economia alemão, na Alemanha são utilizadas cerca de 76.000 toneladas de fluidos de corte anualmente. Dentre estes estão aproximadamente 46.000 toneladas de produtos integrais (não-miscíveis) e 30.000 t miscíveis em água, que podem resultar, dependendo da concentração quando formam a emulsão de 570.000 a 950.000 toneladas de produto [8, 9, 25, 28, 29, 30].

Os custos variam em função do fluido, aditivos e impurezas podendo, chegar a 2.000 DM/t (1US\$ \cong 1,98DM/jan. 2001). Considerando o custo médio de 1.500DM/t para o tratamento, tem-se mais 1,35 bilhões de marcos alemães gastos anualmente pela indústria. De uma maneira geral, os custos de aquisição, administração e descarte dos fluidos representam 16% do custo total de produção anual do setor metal-mecânico na Alemanha. Este valor é bem significativo, pois se comparado ao custo total gasto em ferramentas de corte (7%) chega a ser aproximadamente duas vezes maior [8, 9, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 40].

2.12.1 Técnica de Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte

Usinagem a seco: a usinagem a seco, como o próprio nome diz não utiliza nenhum tipo de produto auxiliar durante o corte do material além do ar. Pode-se dizer que do ponto vista

ecológico e de certa forma econômico apresenta a melhor relação custo/benefício. Apesar de ter apresentado bons resultados em pesquisas feitas em laboratório, a indústria ainda hesita em aplicar esta técnica, pois as funções primárias dos fluidos lubri-refrigerantes deixam de ser cumpridas e a mesma necessita de mais investigações [9, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 36].

Usinagem com mínima quantidade de fluido de corte: existem casos em que a eliminação total do fluido de corte não é possível. A aplicação de pequenas quantidades tem-se mostrado como sendo uma alternativa interessante pois combina um certo grau de refrigeração e lubrificação com um consumo extremamente baixo deste produto (Fig. 27). A usinagem com mínima quantidade de fluido de corte é considerada um elo de ligação entre a usinagem a seco e a convencional [9, 26, 27, 28, 29, 36, 37, 38]. Não existe ainda um termo técnico consagrado para se referir à usinagem com pequenas quantidades de fluido de corte. Para Klocke e Gerschwiller [29], existe uma diferença entre os termos usinagem com quantidade reduzida e usinagem com mínima quantidade de fluido de corte. Como quantidade reduzida tem-se que o volume utilizado é menor que 2 l/min e para a usinagem com mínima quantidade de fluido de corte aplica-se no máximo 50 ml/h. O fluido é injetado na forma de névoa numa mistura ar e fluido de corte que estão em reservatórios diferentes. A mistura segue o princípio de Venturi formando um aerossol, combinado desta forma a propriedade lubrificante do óleo e a refrigerante do ar. Alguns autores consideram que a entalpia de evaporação do óleo também contribui na refrigeração [26, 28, 38].

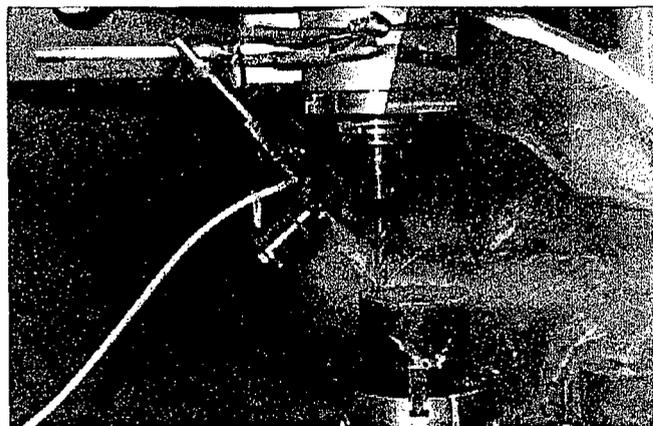


FIGURA 27 – Furação com mínima quantidade de fluido de corte (óleo mineral) [77].

2.12.2 Limitações da Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte

Na usinagem a seco ou com mínima quantidade de fluido de corte as funções tecnológicas primárias dos mesmos como refrigeração, lubrificação e transporte de cavacos são mínimas ou ausentes no processo. Existe, assim, mais atrito e adesão entre o material da peça e da ferramenta, sendo estas submetidas a elevadas cargas térmicas o que pode acelerar o processo de desgaste. Outro aspecto negativo está na dificuldade de controle da formação dos cavacos, da precisão dimensional e geométrica das peças e do comportamento térmico da máquina [9, 28, 29, 31]. Desta maneira são necessárias novas soluções no sistema ferramenta-máquina-peça-processo [9, 26, 27, 28, 29, 36, 37, 38]:

Ferramenta: na usinagem a seco a principal exigência no processo é térmica, sendo necessário que as ferramentas apresentem elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. A utilização de revestimentos e de materiais de ferramentas melhores possibilita usinar a seco, pois apresentam boa resistência à difusão e à oxidação. As ferramentas de metal-duro (principalmente com micro-grãos e com elevado teor de TiC, TaC e Co), CBN, cerâmica, Cermet e diamante são as mais indicadas para a usinagem a seco. Os revestimentos com elevada dureza a quente, baixo coeficiente de atrito como o TiAlN e MoS₂ têm apresentado bom desempenho na usinagem sem fluido de corte. A otimização do substrato, e da geometria da ferramenta que devem ser determinados de acordo com o material da peça, é fundamental para usinar nestas condições.

Máquina: devido às elevadas temperaturas do processo, o cavaco armazena muito mais calor do que no processo convencional. Este podem levar ao aquecimento dos componentes e estrutura da máquina-ferramenta, o que afeta a precisão dimensional das peças. Para operar bem nestas condições a máquina deve ter:

- Sistema de transporte eficiente de cavacos;
- Sistema de exaustão ou aspiração de cavacos;
- Encapsulamento;
- Sistema automático de medição e compensação de erros e;
- Sistema para aplicação de MQFC.

Peça: a usinabilidade e as propriedades termo-mecânicas do material da peça influenciam fortemente a viabilidade tecnológica e econômica da usinagem a seco e com MQFC. O material adequado para ser usinado nestas condições deve ter baixa condutividade térmica, alta capacidade calorífica e alta densidade. Estas características levam a um menor aquecimento da peça, porém elevam a força de corte. Alguns materiais como o ferro fundido (possui grafite que age como lubrificante), aço ferrítico e perlítico (com teores de cálcio) e algumas ligas de alumínio são possíveis de serem usinados sem fluido de corte.

Processo: novos parâmetros de usinagem devem ser empregados quando se utiliza estas técnicas. Alguns experimentos mostram que no fresamento e torneamento o aumento do avanço é benéfico pois tem-se maiores espessuras de corte gerando menos atrito por volume de cavaco usinado. Na furação, além do avanço, aumenta-se a velocidade de corte, diminuindo o tempo de contato entre a peça e ferramenta, aumentando também a produtividade. Porém este aumento no fluxo de cavacos pode prejudicar a saída dos mesmos, recomenda-se que cada caso seja especialmente analisado considerando-se todos aspectos envolvidos.

2.12.3 Furação a Seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte

A furação é um processo de usinagem que apresenta particularidades, sendo que em muitos casos a usinagem totalmente a seco não é possível. Uma das características deste processo é que os cavacos tendem a aderir na ferramenta, podendo levar à ruptura da broca. Pode-se minimizar este problema quando se usina com MQFC. O desempenho da furação a seco e com mínima quantidade de fluido de corte varia de acordo com o material usinado, sendo a seguir comentada a furação de aço, ferro fundido e alumínio sob estas condições [64, 73, 79]:

Aço: o desempenho da furação neste caso varia de acordo com as propriedades do material. Por exemplo, a adição de alguns elementos de liga desfavorece a aplicação desta técnica de usinagem. Aços sem elementos de liga e de médio carbono apresentam resultados favoráveis quando usinados com estas técnicas.

Ferro fundido: já é comprovado que o ferro fundido pode ser usinado a seco sem maiores complicações. O ferro fundido nodular e o maleável podem, em certos casos, apresentar problemas na remoção dos cavacos.

Alumínio: o problema de aderência é a principal característica da usinagem a seco deste material, sendo a aplicação desta técnica praticamente impossível. Recomenda-se neste caso a usinagem com mínima quantidade de fluido de corte.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para investigar o comportamento de brocas helicoidais de aço-rápido revestidas e não-revestidas e de metal-duro revestidas na usinagem do aço sob condições distintas de lubrificação e refrigeração, foram ensaiadas 35 ferramentas, agrupadas em 7 lotes em função de características como fabricante, geometria, material e revestimento. Os revestimentos das brocas de aço-rápido disponíveis eram o nitreto de titânio (TiN), o nitreto de titânio e bissulfeto de molibdênio (TiN+MoS₂) e o nitreto de titânio e alumínio (TiAlN). No caso das brocas de metal-duro um dos lotes era de ferramentas revestidas com nitreto de titânio (TiN) e o outro de nitreto de titânio e alumínio (TiAlN). Os 7 lotes foram ensaiados sob as seguintes condições de lubrificação e refrigeração:

- A seco, ou seja, sem nenhum meio lubri-refrigerante auxiliar além do ar presente no ambiente;
- Emulsão, aplicada em forma de jato a uma vazão de 360 l/h;
- Óleo vegetal aplicada em MQFC a uma vazão de 50 ml/h e;
- Óleo mineral aplicada em MQFC a uma vazão de 50 ml/h.

Para que a qualificação e quantificação do desempenho das ferramentas ensaiadas fosse possível, selecionaram-se parâmetros de processo que pudessem ser acompanhados e quantificados e que refletissem o comportamento dos esforços de corte, do desgaste das ferramentas e da qualidade da operação. Como alguns destes parâmetros estão associados à peça, à ferramenta e à interação de ambos, foi necessária a utilização de diferentes tipos de equipamentos. Este capítulo apresenta os equipamentos, os materiais, algumas das características técnicas mais relevantes, o modo de utilização dos mesmos e as metodologias de aquisição e análise de dados.

3.1 Corpo de Prova

Os corpos de provas têm duas funções distintas neste trabalho: promover o desgaste das ferramentas e possibilitar a aquisição dos dados tecnológicos como a força de avanço,

momento torção e qualidade do furo. Três foram os fatores que determinaram a forma e dimensões finais dos corpos de prova utilizados:

- A forma bruta da matéria-prima fornecida;
- A forma de fixação na máquina-ferramenta e na plataforma piezométrica e;
- As características de usinagem.

Os corpos de prova para aquisição de dados foram fixados em uma placa de três castanhas sobre a plataforma piezométrica. Os corpos para desgaste das ferramentas foram fixados diretamente em uma placa de três castanhas presa sobre a mesa da máquina.

3.1.1 Material do Corpo de Prova

O material utilizado para os corpos de prova foi o aço ABNT 1040 fornecido na forma de barra redonda laminada a quente, sem tratamento térmico e sem acabamento, com diâmetro bruto de 101,6 mm, fornecido pela empresa GERDAU-Aços Finos Piratini S.A. Decidiu-se por este material pelo fato do mesmo ser muito usado na indústria. As barras foram serradas e em seguida faceadas, obtendo-se assim pequenos tarugos de 70 mm de altura por 101,6 mm de diâmetro, como mostra a figura 28. Os dados técnicos do material estão mostrados no anexo A.

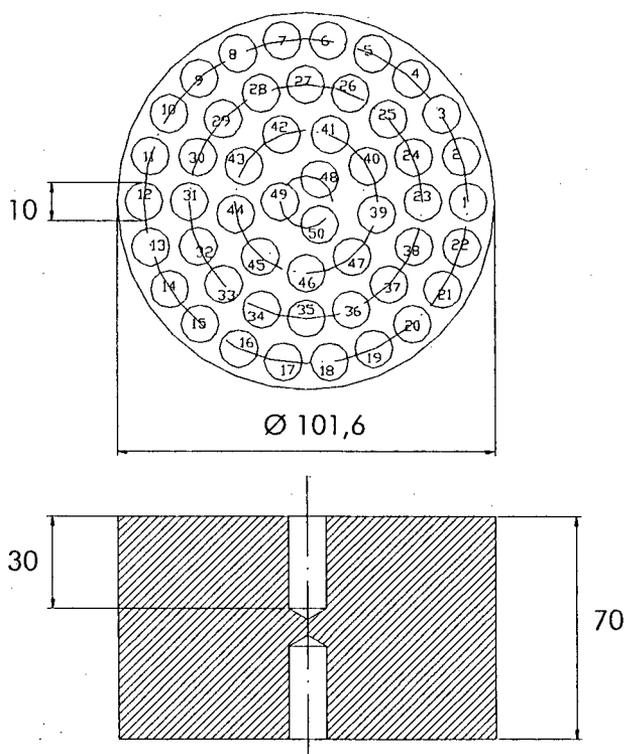


FIGURA 28 - Corpo de prova - dimensões em milímetros.

3.2 Ferramentas de Corte

Para conferir o estado das ferramentas antes dos ensaios, utilizou-se primeiramente a inspeção visual, procurando identificar não-conformidades grosseiras. Após esta análise prévia, partiu-se para análise geométrica, onde foram avaliadas algumas dimensões e ângulos principais, como o ângulo de hélice, ângulo de saída, ângulo de ponta, entre outros. Esta verificação foi feita com o microscópio medidor de brocas GÜHRING modelo PG-100, 10X [82]. As dimensões verificadas não apresentaram valores fora da margem tolerável de erro segundo as especificações do fabricante e normas técnicas [51, 52].

3.2.1 Identificação e Codificação das Ferramentas

Visando garantir o perfeito acompanhamento e controle das ferramentas durante os ensaios foi desenvolvido um sistema de codificação. Gravou-se o código na haste de cada ferramenta com uma caneta de gravação elétrica. O mesmo foi feito para identificar os gumes, gravando o respectivo número do gume no final do canal helicoidal, pois todas as brocas possuíam dois gumes nos quais a evolução dos desgastes foi acompanhada individualmente.

3.2.2 Ferramentas de Corte Ensaaiadas

Foram ensaiadas brocas helicoidais com 10 mm de diâmetro as quais apresentavam diferenças na geometria, material, norma técnica, fabricante e revestimento. As ferramentas com códigos de A até E seguiam a norma DIN338, já as ferramentas F e G a norma DIN 6537K. Todas as ferramentas foram revestidas através por deposição física de vapor, PVD. Algumas das principais informações técnicas sobre as ferramentas estão na tabela 5, enquanto que outras estão nos anexos B e C.

TABELA 5 – Informações técnicas sobre as brocas ensaiadas [51, 52].

Especificação	Código	Quantidade	Geometria	Material	Revestimento	Fabricante
A1211	A	6	N	AR*	-----	B
A1211TiN	B	5	N	AR	TiN	B
A1246TFL	C	5	Alpha GG	AR+Co	TiAlN	B
651	D	5	N	AR	TiN	A
651 E	E	5	N	AR	TiN+MoS ₂	A
A3265TiN	F	4	Alpha 2	MD** - P40	TiN	B
A3265TFL	G	4	Alpha 2	MD - P40	TiAlN	B

* Aço-rápido

** Metal-duro

3.2.3 Parâmetros de Usinagem

Os parâmetros de usinagem foram selecionados com base na literatura e recomendações dos fabricantes das ferramentas, e procurou-se utilizar os limites superiores tanto de velocidade de corte quanto de avanço nas condições ideais de lubrificação e refrigeração para cada ferramenta. Estes parâmetros foram mantidos constantes nas quatro condições de lubrificação e refrigeração ensaiadas, permitindo assim avaliar apenas a influência da forma de aplicação e do tipo do meio lubri-refrigerante. Os dados de corte para cada tipo de ferramenta estão na tabela 6.

TABELA 6 – Parâmetros de corte [1-5, 9, 25, 47, 51, 52].

Ferramenta	Velocidade de Corte – v_c [m/min]	Avanço – f [mm]	Rotação – n [rpm]
A	32	0,185	1018
B	32	0,185	1018
C	45	0,350	1432
D	32	0,185	1018
E	32	0,185	1018
F	75	0,180	2353
G	75	0,180	2353

3.2.4 Estratégia de Usinagem

Realizou-se a furação na direção vertical, no sentido descendente, em cheio, sem pré-furo e sem furo de centro. A profundidade de cada furo usinado foi de 30 mm, sendo este não-passante e considerado não-profundo, segundo Stemmer [47]. O espaçamento entre furos, e entre furo e borda do corpo de prova, foi de 0,3 vezes o diâmetro, ou seja, 3 mm. Cada face do corpo de prova permitia a realização de cinquenta furos, totalizando três metros em comprimento usinado por corpo de prova.

3.3 Meios Lubri-refrigerantes

A escolha dos tipos e das condições de lubri-refrigeração é fundamental para se poder avaliar o desempenho das ferramentas na usinagem com meios lubri-refrigerantes e na usinagem a seco. Seguindo critérios técnicos, econômicos e ambientais, decidiu-se dentre os fluidos de corte disponíveis no LMP avaliar dois que pudessem ser aplicados na usinagem com MQFC (óleo vegetal e mineral). Além destes, optou-se também pela usinagem com emulsão, já que este é um dos produtos que tem o uso mais difundido para usinagem de metais [28, 29]. As características técnicas destes três produtos são apresentadas no anexo D.

3.3.1 Formas de Aplicação dos Meios Lubri-refrigerantes

Emulsão: a furação com emulsão foi realizada utilizando os próprios recursos para aplicação de fluido de corte da máquina na concentração em volume de 6% adicionado à água e a uma vazão de aproximadamente 360 l/h. O produto era aplicado à temperatura ambiente através de um único duto inclinado formando um ângulo de aproximadamente 45° entre a peça e ferramenta, como mostra a figura 29. Procurou-se, neste caso, simular as condições de lubrificação e refrigeração que geralmente são encontradas na indústria metal-mecânica.

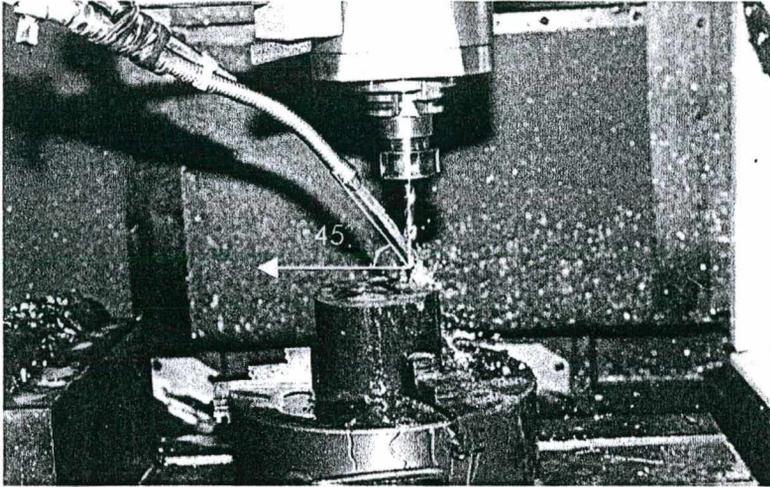


FIGURA 29 – Furação com a utilização de emulsão [77].

Óleo mineral: a aplicação do óleo mineral foi feita na forma de névoa em MQFC utilizando apenas um bico injetor a uma vazão de 50 ml/h, a uma pressão de 3 bar e a temperatura ambiente. A névoa formava uma inclinação entre a superfície da peça e a ferramenta de aproximadamente 45°, como mostra a figura 30.

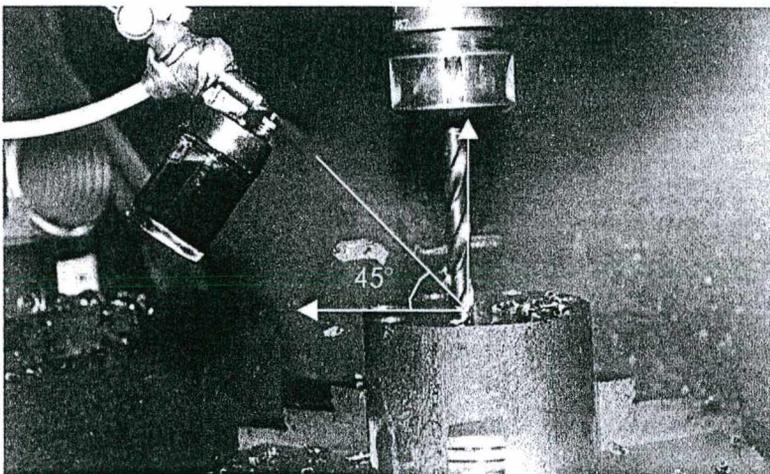


FIGURA 30 – Furação com MQFC utilizando óleo mineral.

Óleo vegetal: o óleo vegetal foi aplicado na forma de névoa em MQFC por meio de dois bicos injetores, a uma pressão de 3 bar a temperatura ambiente, estando cada um deles inclinados em cerca de 45° entre a superfície da peça e a ferramenta. A vazão de aplicação foi de 50 ml/h. A figura 31 mostra a forma de aplicação.

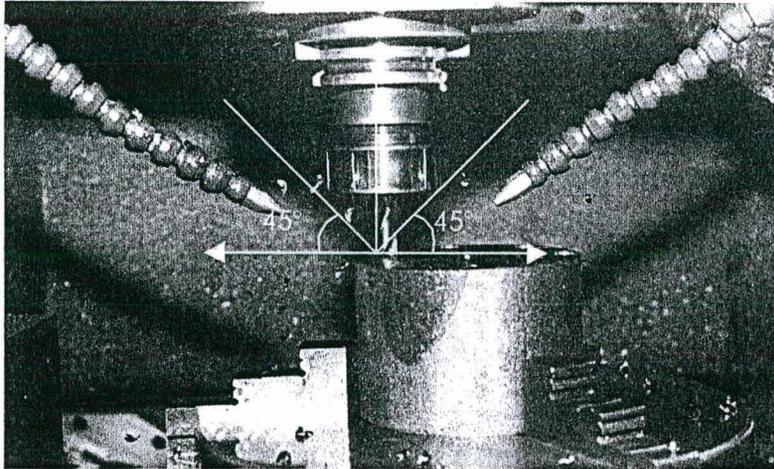


FIGURA 31 – Furação com MQFC utilizando óleo vegetal.

A seco: esta condição é a considerada ideal do ponto de vista ecológico. É uma condição extrema pois neste caso usa-se completamente a seco, sem a introdução de qualquer meio lubri-refrigerante, como mostra a figura 32.

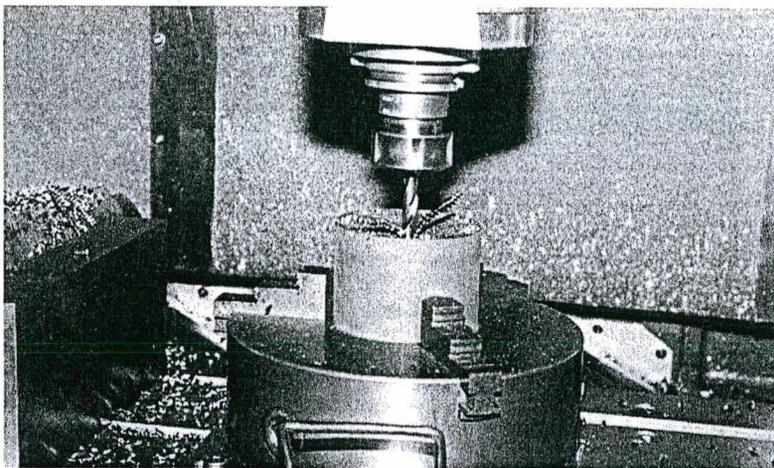


FIGURA 32 – Furação a seco.

3.3.2 Equipamento para aplicação do óleo vegetal e mineral em MQFC

Nas aplicações em quantidades mínimas de fluido de corte empregou-se um atomizador pneumático (Fig. 33). As informações técnicas deste podem ser encontradas no anexo E.

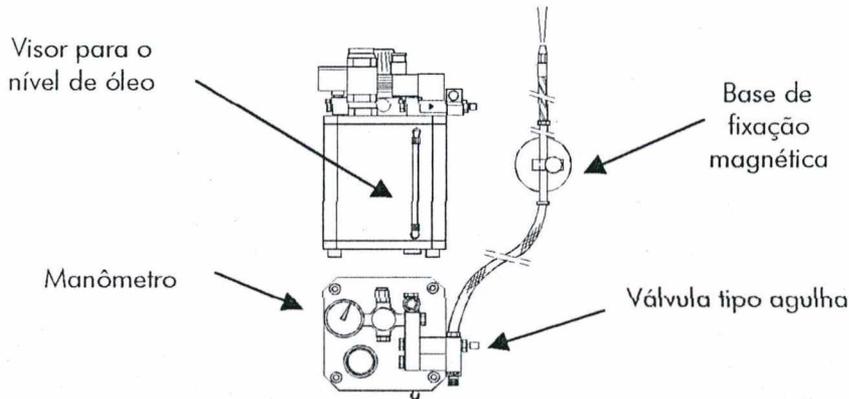


FIGURA 33 – Atomizador pneumático para aplicação de fluido de corte em mínima quantidade [87].

3.4 Máquina-ferramenta

Utilizou-se uma fresadora vertical CNC modelo Polaris F400 da marca ROMI (Fig. 34). Esta possui três eixos de movimentação sincronizados nas coordenadas X, Y e Z (dados técnicos no anexo F). Foram criados através da linguagem interativa Heidenhain dois programas, um para provocar o desgaste das brocas e outro para a aquisição da força axial e momento torçor.

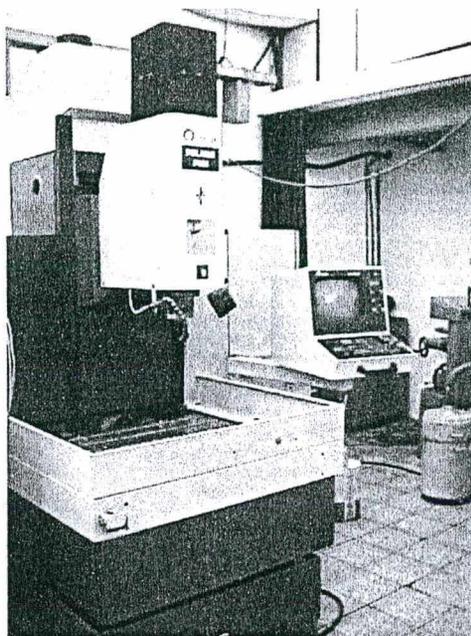


FIGURA 34 – Fresadora Polaris F400.

3.5 Controle da Aquisição dos Dados de Força e Desgaste

De uma forma geral a seqüência de atividades para a execução dos ensaios está mostrada simplificada na tabela 7. Para poder controlar e não perder nenhuma aquisição de dados, foram desenvolvidos e utilizados formulários de acompanhamento para cada uma das ferramentas visando monitorar e registrar informações relevantes durante os ensaios. Um exemplo deste formulário encontra-se no anexo G.

TABELA 7 – Seqüência de atividades para execução do ensaio.

Etapa	Descrição
1	Verificação da qualidade geométrica da broca
2	1ª Aquisição dos dados força e momento torçor (broca nova)
3	Desgaste da ferramenta (3 m p/ AR) e 6 m (p/ MD) em comprimento linear usinado
4	2ª Aquisição dos dados de força, momento torçor e desgaste
5	São repetidas as etapas 3 e 4 até atingir 15 m (p/ AR) ou 30 m (p/ MD) de material usinado ou o colapso da ferramenta

3.6 Sistema de Aquisição da Força Axial e Momento Torçor

A força axial e o momento torçor foram os parâmetros selecionados para serem monitorados durante a execução dos ensaios. Os mesmos contribuem na caracterização do processo de furação. Sabe-se que estas duas grandezas são influenciadas pela evolução do desgaste das ferramentas.

3.6.1 Equipamentos

O conjunto de equipamentos utilizados na aquisição dos dados de força e momento estão mostrados na figura 35.

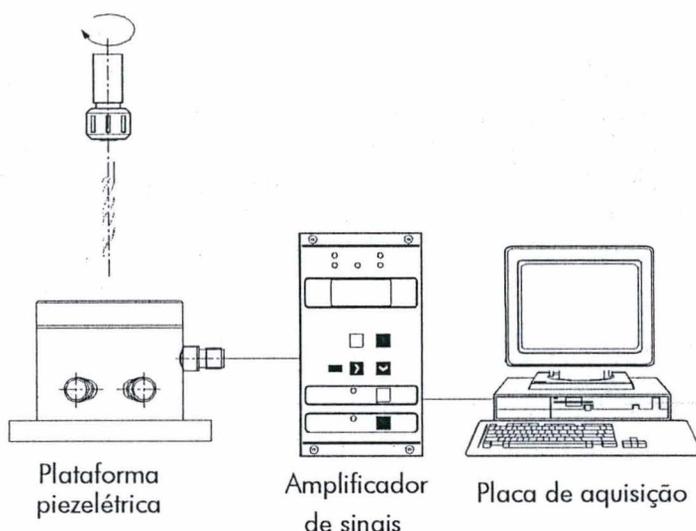


FIGURA 35 – Sistema de aquisição de sinais [42].

Plataforma piezométrica: utilizou-se o método direto de medição para aquisição dos dados tecnológicos de força axial e de momento torçor utilizando uma plataforma piezométrica para ensaios de furação com aquisição dos sinais na direção Z [1, 3, 5, 6, 55]. Nesta direção adquiriu-se a força axial através do canal 1 e o momento torçor em torno do eixo Z através do canal 2. Os dados técnicos da plataforma e as informações sobre a calibração estão apresentados no anexo H. A calibração foi realizada antes do início dos ensaios, seguindo os procedimentos existentes no LMP [83].

Amplificador de sinais: a baixa intensidade dos sinais gerados na plataforma piezométrica torna necessária a amplificação para tratamento posterior. Esta amplificação dos sinais é feita

por dois amplificadores de sinais da KISTLER INSTRUMENTE, modelo AG 5006. Deve-se salientar que cada amplificador é ajustado de acordo com a sensibilidade dos cristais piezelétricos na direção correspondente de solicitação. Os dados técnicos dos amplificadores estão no anexo H.

Microcomputador, placa e programa de aquisição: a placa de aquisição juntamente com um programa computacional dedicado estão instalados em um microcomputador. A função deste sistema é receber, converter e armazenar os sinais provenientes do amplificador.

3.6.2 Metodologia de Aquisição

Através do conhecimento adquirido em ensaios de furação no LMP e durante a revisão bibliográfica, decidiu-se estabelecer a aquisição dos dados em função do comprimento linear usinado, sendo este previamente estabelecido. Primeiramente adquiriram-se a força axial e momento com a broca nova. No caso das brocas de aço-rápido, foram feitas as aquisições de 3 em 3 metros e para as de metal-duro de 6 em 6 metros. Estas aquisições eram feitas quando possível até se atingir 15 metros, para as ferramentas de aço-rápido e 30 metros para as de metal-duro. Este comprimento máximo de usinagem foi estabelecido como um dos critérios de fim de vida da ferramenta, sendo o outro critério o colapso da ferramenta.

Para aquisição dos sinais de força axial e momento torçor, utilizou-se a plataforma piezelétrica, estando o sistema de aquisição ajustado para adquirir 200 medições por segundo (0,2 kHz) em cada canal durante todo o período de execução do furo. Estes sinais são analógicos, sendo portanto necessária a conversão para a forma digital, possível por meio da placa computacional e do programa computacional dedicado. Após a conversão os sinais foram arquivados para serem posteriormente tratados e analisados. Os tempos e as freqüências de aquisição durante cada ensaio foram ajustados no programa.

3.6.3 Metodologia de Avaliação

Como critério para comparação dos esforços de usinagem em cada ponto de medição, adotou-se a média dos valores da força e momento, dentro do intervalo de usinagem estabilizada aproximadamente entre 2 e 9 segundos, como mostra a figura 34. Nesta figura são mostrados todos os pontos adquiridos durante a furação do corpo de prova

na plataforma piezelétrica. Os sinais já estão dispostos em um gráfico e transformados de sinais de tensão para unidades de força, o que foi possível através da equação de transferência obtida na calibração do sistema, apresentada no anexo H. O mesmo foi feito para o momento torçor. A dispersão dos valores mostrados no gráfico deve-se às características dinâmicas do processo de furação.

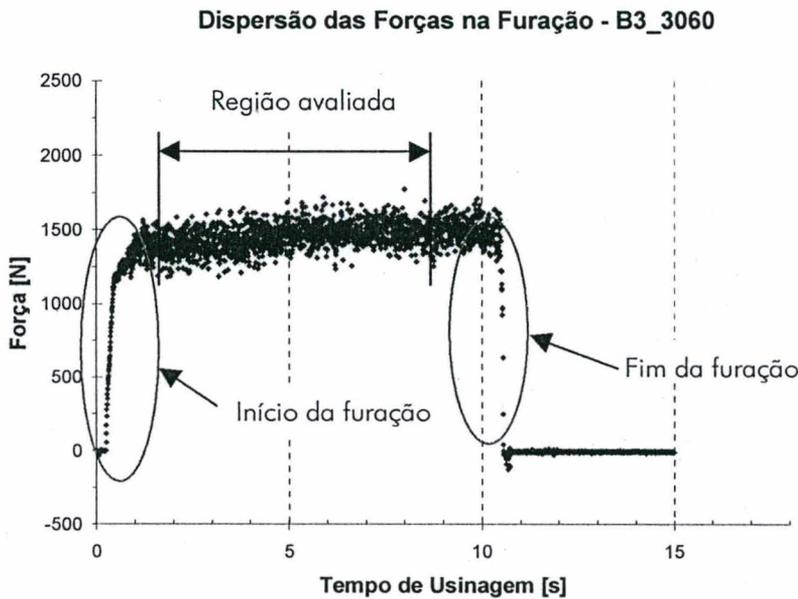


FIGURA 36 – Sinais de força adquiridos durante a execução de um furo.

Como critério de comparação entre os experimentos optou-se pela média aritmética da força e do momento na faixa de usinagem estabilizada; ou seja, fora da região de início (entrada da broca) e final (saída da broca) do furo. Para uma melhor visualização do comportamento da curva mostrada na figura 36 tirou-se a média móvel, sendo esta uma seqüência de médias calculadas a partir de partes de uma seqüência de dados. Em um gráfico, a média móvel uniformiza as flutuações dos dados, mostrando assim, mais claramente, o padrão ou a tendência. A figura 37 mostra a curva com a média móvel da dispersão de todos valores mostrados anteriormente na figura 36.

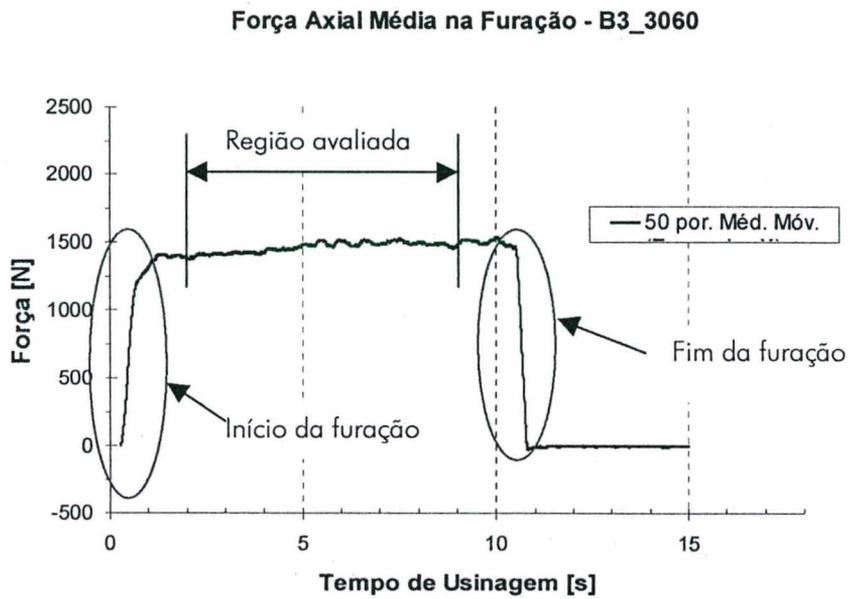


FIGURA 37 – Forças médias durante a execução de um furo.

3.7 Sistema para Avaliação do Desgaste

O objetivo do acompanhamento da evolução das marcas de desgaste é obter um parâmetro que possa, juntamente com os outros, como o comportamento dos esforços de corte e da qualidade da furação, possibilitar a análise do desempenho das ferramentas nas diferentes condições ensaiadas. Muitas informações sobre os fenômenos que ocorrem na usinagem podem ser obtidas através da análise do desgaste das ferramentas, como já foi discutido no item 2.8. Descreve-se a seguir quais equipamentos e de que maneira foram utilizados na aquisição e avaliação do desgaste nas ferramentas.

3.7.1 Equipamentos

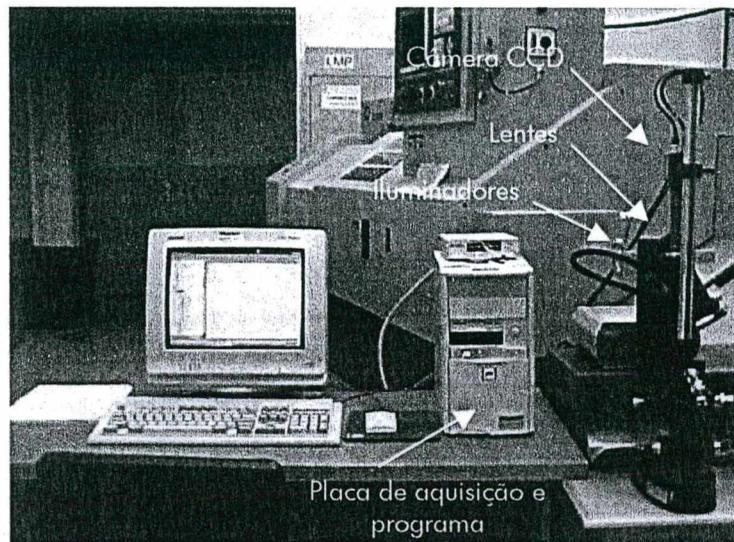


FIGURA 38 – Sistema para aquisição de imagens e avaliação de desgaste.

Câmera CCD: a câmera CCD, com resolução de 570 (h) x 350 (v) da empresa Pulnix American Inc. que, juntamente com um conjunto de prolongadores e lentes, sistema de iluminação (Fiber-lite A3200 da empresa americana Dolan-Jonner Industries Inc.) e um microcomputador com placa de aquisição de imagens digitais, forma o sistema de aquisição de imagens. Os dados técnicos da câmera estão no anexo I.

Suporte para cone ISO40: este suporte foi desenvolvido no LMP visando dar agilidade ao posicionamento do conjunto ferramenta e cone de fixação na máquina durante a aquisição das imagens. Com este suporte, não foi necessário desmontar o conjunto cone, pinça de fixação e ferramenta durante a aquisição de imagens. O cone era posicionado diretamente neste suporte. Após um pequeno ajuste na distância focal, nas luzes e no posicionamento da ferramenta as imagens da evolução do desgaste eram adquiridas.

Microcomputador, placa de aquisição e programa: a placa de aquisição, juntamente com um programa computacional, estão instalados em um microcomputador para possibilitar a aquisição e armazenamento de imagens digitais da evolução do desgaste em diversas partes da ferramenta.

3.7.2 Metodologia de Aquisição

Foi empregada a metodologia proposta por Schroeter e Teixeira [81], na qual registram-se os defeitos ocorridos na face e no flanco da ferramenta através de uma câmera CCD em intervalos pré-determinados, conforme o planejamento experimental. Estes intervalos são os mesmos que foram definidos para a aquisição da força axial e momento torçor como no item 3.6.2. Utiliza-se o sistema de aquisição de imagens descrito no item 3.7.1 e mostrado na figura 38. A câmera e as lentes estão montadas de forma que a ferramenta fique posicionada no campo focal do sistema de maneira adequada. As superfícies que apresentam as marcas de desgaste devem estar posicionadas perpendicularmente ao eixo das lentes. A boa qualidade das imagens é essencial para facilitar posteriormente a análise das mesmas, sendo necessários pequenos ajustes no posicionamento da superfície, na iluminação (direção e intensidade) e na distância focal. Estes ajustes influenciam diretamente a qualidade das imagens. As dimensões da ferramenta e as dimensões esperadas das marcas de desgaste influenciam na escolha do fator de ampliação. Com base em ensaios anteriores e pré-testes utilizou-se o aumento de 62 vezes.

No caso das brocas é importante, além do registro das imagens das faces e flancos, a aquisição das imagens das guias laterais, do gume transversal e das quinas das ferramentas.

3.7.3 Metodologia de Avaliação

A quantificação do desgaste ocorrido no flanco da ferramenta segue a metodologia proposta por Schroeter e Teixeira [81]. Inicialmente adquiriram-se as imagens de uma medida conhecida para servir de referência no momento da calibração da escala de medição do programa computacional usado na quantificação do desgaste de flanco máximo $VB_{máx}$. Utilizou-se a imagem de um padrão de 1 mm adquirida com o mesmo fator de ampliação, que foi mantido constante durante todos os ensaios. Mediu-se a distância entre a interseção da guia lateral e flanco e a quina da ferramenta. Isto é necessário pois em certos casos ocorre o recuo do gume principal. Na figura 39 à direita, o gume recuou em cerca de 1 mm, sendo assim o desgaste de flanco máximo foi igual a 0,19 mm. Como critério de avaliação dos desgastes, adotou-se o gume que apresentava a maior marca de desgaste em cada ponto de medição como sendo o valor representativo.

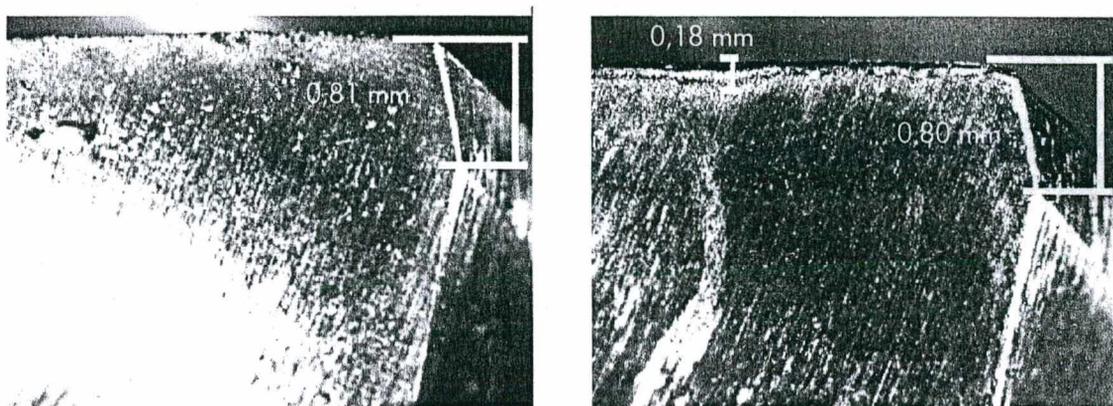


FIGURA 39 – Exemplo de medição do desgaste de flanco máximo.

3.8 Sistema para Avaliação da Qualidade dos Furos

Baseado nas informações consultadas sobre ensaios de furação, decidiu-se avaliar a qualidade dos furos através da análise de certos parâmetros como a textura superficial, erros geométricos e dimensionais dos furos [2, 3, 4, 5, 41, 42, 47, 69]. A medição dos parâmetros indicativos da qualidade da furação foi feita em todos os furos dos corpos de prova de aquisição de dados. Os intervalos de aquisição foram os mesmos empregados na aquisição dos dados de força e momento, como descrito anteriormente no item 3.6.2.

3.8.1 Equipamentos

Na avaliação da qualidade dos furos, foi necessária a utilização de equipamentos que possibilitassem a análise de diferentes parâmetros como a rugosidade da parede do furo, o desvio de circularidade, o desvio de cilindridade e o diâmetro médio do furo.

Rugosímetro: para quantificar a textura superficial da parede dos furos foi utilizado o rugosímetro Perthometer modelo S8P fabricado pela empresa Feinpruef GmbH.

Máquina de medir por coordenadas: na avaliação dos erros geométricos e dimensionais resultantes do processo de furação, utilizou-se a máquina de medir por coordenadas Mitutoyo Bright do Laboratório de Metrologia da Fundação CERTI. As características técnicas desta máquina estão no anexo J. O processo de aquisição de dados foi feito por meio de

de um cabeçote apalpador Renishaw PHC9 - M51860 e controlada com auxílio do programa computacional de medição Geopak - 3, versão 5.30.

3.8.2 Metodologia de Aquisição

A seguir descreve-se a metodologia utilizada na aquisição dos dados selecionados para caracterizarem a qualidade do processo de furação.

Textura superficial: utilizou-se um apalpador mecânico com ponta de diamante com $10\ \mu\text{m}$ de raio de ponta na aquisição dos parâmetros R_a e R_r . As normas DIN4762 e ISO 4287/1 recomendam a determinação do *cut-off* de medição a partir do valor da rugosidade R_a . Foram realizadas então pré-medições de alguns valores de R_a entre o primeiro e o último furo gerado por cada ferramenta ensaiada. Após este procedimento, iniciaram-se as medições definitivas. As posições onde foram feitas as medições estão mostradas na figura 40.

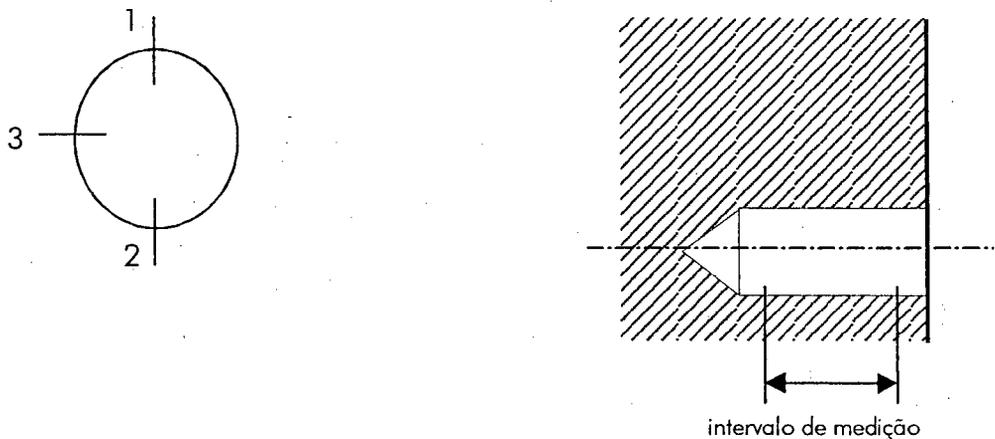


FIGURA 40 – Posições da aquisição dos dados da textura superficial.

As medições foram realizadas com o *cut-off* de $2,5\ \text{mm}$ pois na grande parte das pré-medições os valores do R_a encontraram-se na faixa entre 2 e $10\ \mu\text{m}$. Com isso os valores obtidos caracterizam sempre a mesma região do furo. A utilização deste *cut-off* resultou em um comprimento linear de medição de $17,5\ \text{mm}$, mas como devem ser desconsiderados o primeiro e o último intervalo de medição cada um de $2,5\ \text{mm}$, o comprimento efetivo de medição foi de $12,5\ \text{mm}$. Este intervalo efetivo de medição corresponde praticamente à

região central do furo compreendida em 10 e 22,5 mm de profundidade. Para as ferramentas F e G de metal-duro, durante as pré-medidas obtiveram-se alguns valores de R_a abaixo de 2 μm . Neste caso, recomenda-se um *cut-off* de 0,8 mm, e com isso o intervalo de medição seria de 5,6 mm, sendo que destes 4 mm seriam o comprimento efetivo medido. Algumas medições de R_a resultaram em valores maiores que 10 μm sendo o *cut-off* recomendado de 8 mm. São medidos neste caso 56 mm, dos quais 40 mm representam o comprimento efetivo de medição. A utilização deste *cut-off* era entretanto inviável, visto que os furos possuíam 30 mm de profundidade.

Erro de circularidade, cilindridade e diâmetro médio do furo: visando dar agilidade ao processo de medição e em função dos recursos da máquina disponível para as medições, a aquisição dos dados da circularidade, da cilindridade e do diâmetro médio do furo foi realizada da seguinte maneira:

Primeiramente foi feito um programa numérico de modo que este garantisse que a forma de aquisição dos dados durante toda a medição fosse realizada sempre da mesma maneira e nos mesmos pontos e profundidades estabelecidas. Partindo da metodologia desenvolvida por Teixeira [41], modificou-se a mesma em função do equipamento disponível e da quantidade de medições a serem realizadas. Desenvolveu-se então uma nova metodologia, onde o apalpador tocava quatro pontos em um mesmo plano possibilitando a geração através de um programa computacional de uma circunferência, em três profundidades distintas previamente fixadas, como mostrado na figura 41. Desta forma, não tem-se com exatidão toda a característica da circunferência, pois o apalpador não a percorre por inteiro; tem-se entretanto uma indicação desta forma geométrica construída pelo programa computacional a partir destes quatro pontos. Como todas as medições foram feitas da mesma forma, os resultados servem como critério de comparação da qualidade dos furos. Devido à limitação do comprimento de penetração do apalpador os pontos 1, 2 e 3 (Fig. 41) estavam a 2, 7 e 11 mm de distância da borda do furo, procurando assim caracterizar o estado inicial, intermediário e final do mesmo.

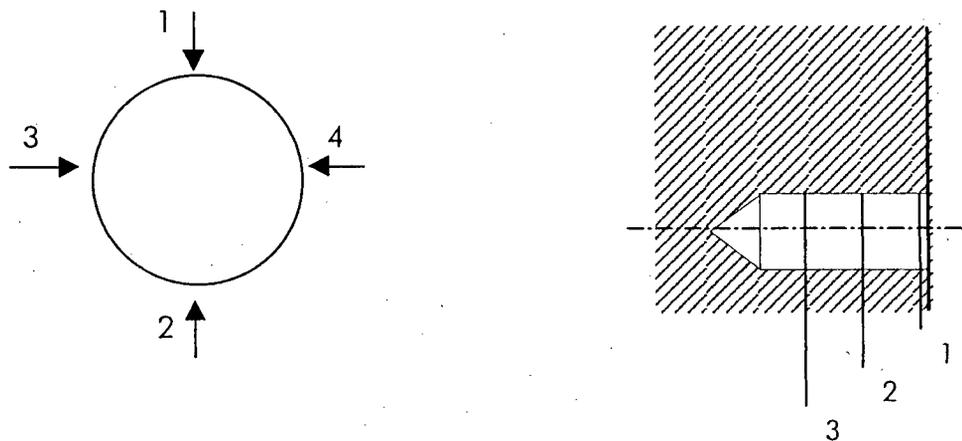


FIGURA 41 – Posições da aquisição dos dados do erro de circularidade, cilindricidade e diâmetro médio do furo.

3.8.3 Metodologia de Avaliação

Descreve-se a seguir a metodologia utilizada na análise dos dados selecionados para caracterizarem a qualidade do processo de furação.

Textura superficial: a partir das três medições realizadas nos pontos 1, 2 e 3 mostrados na figura 40, obteve-se o valor final da rugosidade através da média aritmética das medições de R_a e R_q . Mediram-se estes valores em todos os furos existentes nos corpos de prova utilizados na aquisição dos dados de força e momento.

Erro de circularidade: a partir dos quatro pontos adquiridos nos três planos determinados, o programa define a circunferência que melhor se adapta a estes pontos. Tendo como referência o diâmetro de 10 mm são gerados então os desvios de circularidade, sendo este valor o maior desvio radial apresentado pela circunferência real tendo como referência a circunferência ideal. Para cada furo, tirou-se a média aritmética dos valores do desvio de circularidade nas três profundidades citadas anteriormente.

Erro de cilindricidade: a partir das circunferências geradas nos três planos, o programa computacional define o cilindro que melhor se adapta a estas circunferências. Tendo como

referência o cilindro ideal, o desvio de cilindricidade do furo é obtido. Este valor representa a diferença radial entre o ponto mais interno e externo do cilindro gerado em relação ao cilindro ideal.

Diâmetro médio do furo: a partir das circunferências geradas nos três planos, o programa computacional calcula o valor do diâmetro médio do furo.

Pode-se dizer que é de fundamental importância para o pesquisador ter definido com clareza os objetivos e os parâmetros a serem obtidos através dos seus ensaios. Para isso os materiais necessários, a utilização dos equipamentos, os métodos de aquisição e análise dos parâmetros controlados devem estar dominados e estabelecidos antes do início dos ensaios.

O desenvolvimento e uso de materiais e equipamentos que façam com que o andamento das atividades seja facilitado e não esquecidas levam a um melhor gerenciamento do processo, de materiais e do tempo. Este tipo de cuidado também confere repetibilidade na execução das atividades.

Outro aspecto que vale salientar está na importância da execução dos ensaios e da análise dos resultados de uma só vez, de modo que as análises subjetivas sejam realizadas da mesma maneira.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo abordam-se os resultados obtidos nos experimentos, sendo estes apresentados na forma gráfica e em seguida analisados. Deve-se salientar, que os resultados apresentados neste trabalho são provenientes do ensaio individual de ferramentas. A justificativa deste fato está principalmente no objetivo principal do trabalho, que é apresentar tendências de comportamento em diferentes condições de lubrificação e refrigeração. Deste modo, os resultados e as observações discutidas a partir de agora procuram servir apenas como um ponto de partida, ou seja, como um referencial para futuras pesquisas nas quais os resultados poderão ser investigados mais detalhadamente através de tratamentos estatísticos, por meio da repetibilidade dos ensaios em cada uma das condições específicas. A ordem de apresentação e análise dos gráficos nas quatro condições ensaiadas foi definida em função do material da ferramenta e do tipo de revestimento, como segue:

4.1 Ferramentas de Aço-rápido sem Revestimento – A1211 – (lote A);

4.2 Ferramentas de Aço-rápido com Revestimento de Nitreto de Titânio – A1211TiN – Fabricante B (lote B);

4.3 Ferramentas de Aço-rápido com Revestimento de Nitreto de Titânio – 651TiN – Fabricante A (lote D);

4.4 Ferramentas de Aço-rápido com Revestimento Nitreto de Titânio e Bissulfeto de Molibdênio – 651TiN+MoS₂ – (lote E);

4.5 Ferramentas de Aço-rápido com Revestimento Nitreto de Titânio e Alumínio – A1246TFL – (lote C);

4.6 Ferramentas de Metal-duro com Revestimento de Nitreto de Titânio – A3265TiN – (lote F) e;

4.7 Ferramentas de Metal-duro com Revestimento de Nitreto de Titânio e Alumínio – A3265TiAlN – (lote G).

Baseado na literatura, na importância para a validação do trabalho experimental e na capacidade de monitoramento e medição com os equipamentos disponíveis nos

laboratórios da UFSC, selecionaram-se as seguintes grandezas para caracterizarem o processo de furação nas quatro condições de refrigeração e lubrificação testadas [5, 27, 43, 44, 69, 70, 72, 73]:

- Evolução do desgaste de flanco máximo;
- Curva de tendência do comportamento da força axial média em função do comprimento linear usinado;
- Curva de tendência do comportamento do momento torçor médio em função do comprimento linear usinado;
- Rugosidades R_a e R_t da parede do furo;
- Erro de circularidade;
- Erro de cilindridade e;
- Diâmetro médio do furo.

Visando complementar a análise dos resultados apresenta-se a classificação IT dos furos através da análise do diâmetro médio, tendo como referência a norma DIN7151(11.64). Esta classificação, porém, pode ser feita também sob outros parâmetros indicativos da qualidade do furo, como por exemplo o erro de circularidade, de cilindridade e de posição (excentricidade) [4, 25, 88].

4.1 Ferramentas de Aço-rápido sem Revestimento – A1211 – (Lote A)

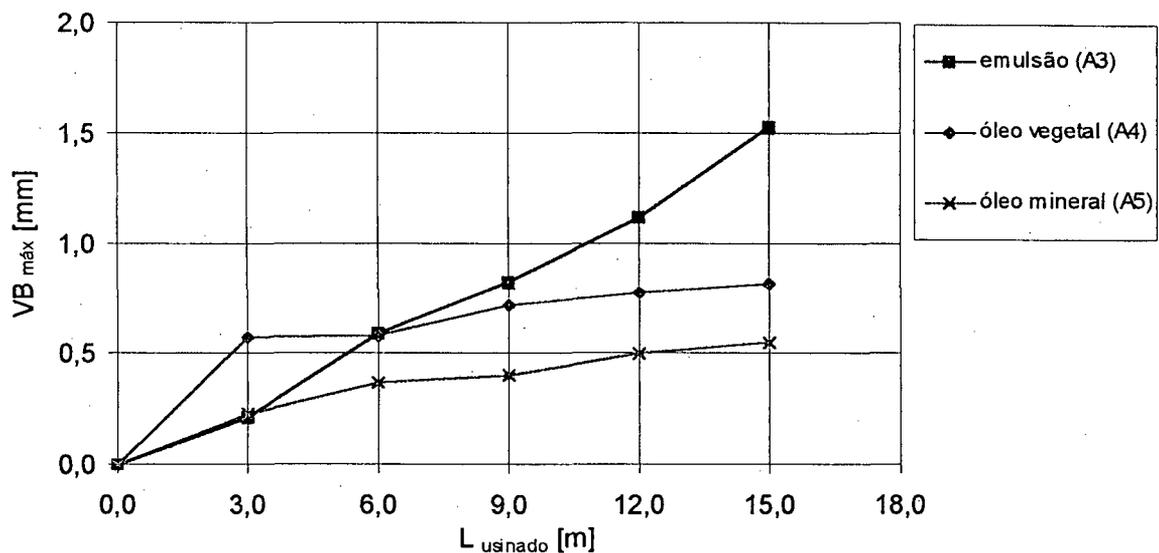
Foram utilizadas seis ferramentas, das quais três usinaram a seco para se poder conhecer melhor o comportamento das mesmas nesta condição. Os códigos e as condições de usinagem utilizados estão na tabela 8.

TABELA 8 – Ferramentas de aço-rápido sem revestimento.

Código	Condição
A1	A seco
A2	A seco
A3	Emulsão
A4	MQFC – óleo vegetal
A5	MQFC – óleo mineral
A6	A seco

As ferramentas A1 e A2 foram desconsideradas na análise dos resultados pois sofreram colapso de forma prematura. Isto impossibilitou a aquisição de dados suficientes para uma apresentação e análise criteriosa do comportamento destas ferramentas. No início do ensaio com a ferramenta A1 houve uma falha operacional na máquina-ferramenta que resultou na quebra da broca. A ferramenta A2 chegou a executar 31 furos totalizando 0,93 m de usinagem. Sendo assim, adquiriram-se os dados tecnológicos da broca A2 apenas quando estava nova. Devido a estas duas ocorrências, repetiu-se o ensaio a seco utilizando uma terceira ferramenta (A6).

4.1.1 Desgaste de Flanco Máximo



Desgaste de Flanco $VB_{máx} \times L_{usinado}$
 Ferramenta A; Aço-rápido; A1211; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

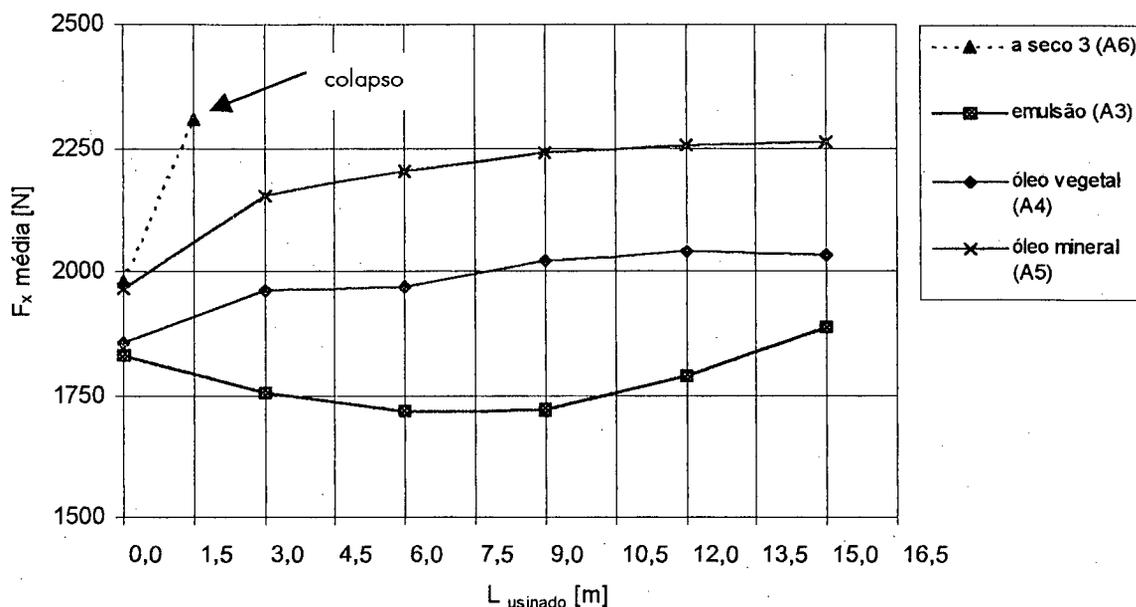
FIGURA 42 – Tendência de evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) nas condições ensaiadas.

O comportamento evolutivo do $VB_{máx}$ das ferramentas de aço-rápido sem revestimento é apresentado na figura 42. As ferramentas A1, A2 e A6 usinaram a seco e quebraram antes dos 3 m, comprimento definido como sendo o ponto para a realização da primeira aquisição das imagens e avaliação do $VB_{máx}$.

A ferramenta A3, que usinou utilizando emulsão, dentre as ferramentas monitoradas foi a que apresentou o crescimento mais acentuado da marca de desgaste de flanco, principalmente a partir dos 6 m de usinagem. A abrasão mecânica, que é um dos principais mecanismos que influenciam este tipo de desgaste, como apresentado no item 2.8 e possivelmente, a menor capacidade de lubrificação da emulsão se comparada aos óleos aplicados em MQFC levou a este resultado. Segundo Weingaertner [75], além disso, existe a hipótese de que a diminuição média da temperatura pela refrigeração da raiz do cavaco leve a uma diminuição do fator de recalque, menor contato entre cavaco e ferramenta e mesmo para uma diminuição da força de avanço, a maiores pressões de contato, que podem levar a micro e macrolascamentos do gume.

Nos casos onde utilizou-se a técnica de minimização de fluido corte (A4 e A5), o comportamento evolutivo das curvas de desgaste deu-se de forma semelhante, principalmente a partir dos 6 metros. Percebe-se que a ferramenta A4 (óleo vegetal) apresentou os maiores valores de desgaste nos 6 primeiros metros de usinagem porém, a partir deste ponto, o desgaste da broca A3 a superou. No caso da broca A5, que usinou com óleo mineral, os valores de $VB_{m\acute{a}x}$ foram os menores dentre todas as condições monitoradas. Aos 15 m este valor chegou a ser 65% menor que o $VB_{m\acute{a}x}$ apresentado no mesmo ponto na usinagem com emulsão e 30% menor que na usinagem com óleo vegetal. Este resultado mostra aparentemente que o óleo mineral atuou mais efetivamente na lubrificação do processo do que os outros meios lubri-refrigerantes utilizados. Esta possibilidade é reforçada por Koepfer [80], pois segundo ele os produtos lubri-refrigerantes derivados do petróleo são os melhores lubrificantes. Porém, para Eversheim et al. [24] os óleos vegetais apresentam melhores características lubrificantes do que os minerais.

4.1.2 Força Axial Média



Força axial média X L_{usinado}
 Ferramenta A; Aço-rápido; A1211; DIN338
 $d=10 \text{ mm}$; $v_c=32 \text{ m/min}$; $f=0,185 \text{ mm}$; $n=1018 \text{ rpm}$
 Materia da peça: aço ABNT1040

FIGURA 43 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) em todas condições ensaiadas.

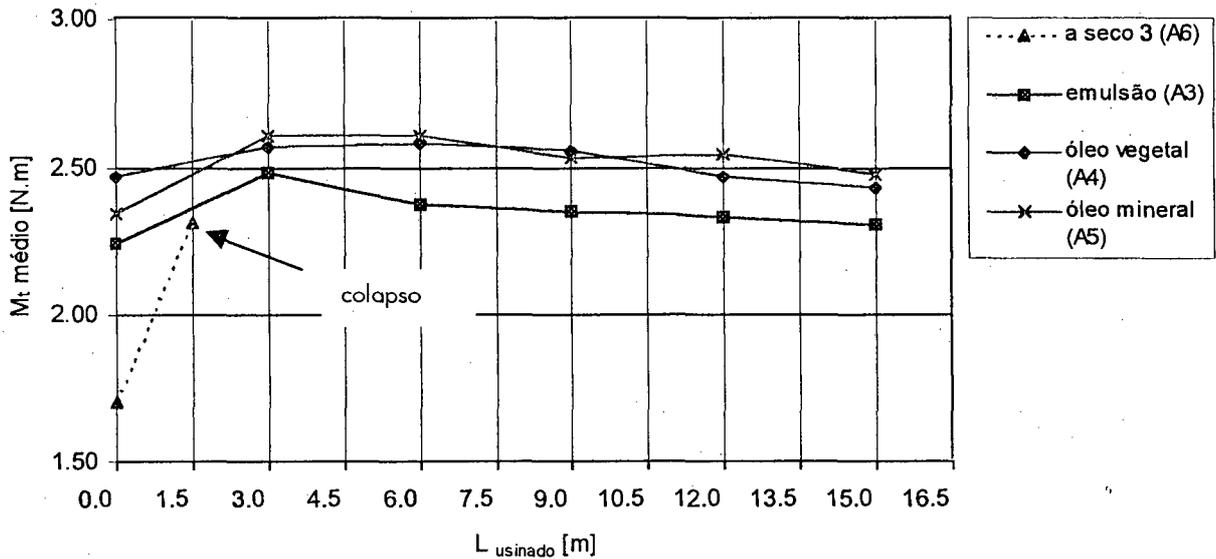
A broca A6 foi a terceira ferramenta a ser ensaiada a seco após as brocas A1 e A2 terem entrado em colapso prematuramente, como comentado anteriormente. Por este motivo, decidiu-se adquirir os dados desta ferramenta antes do comprimento planejado experimentalmente, ou seja, a 1,5 m de usinagem (Fig. 43). O valor da força neste ponto foi o maior apresentado durante o ensaio deste lote de ferramentas. Isto pode ser atribuído provavelmente à elevada temperatura na região de cisalhamento e conseqüentemente maior recalque do cavaco (maior trabalho de deformação), afetando assim a capacidade de corte da broca. Acredita-se que esta temperatura estivesse acima da possível de ser suportada pelo material da ferramenta, pois o mesmo começa a se tornar instável aproximadamente a partir dos 500°C. Este fato pôde ser percebido, porque a broca A6 deformou-se plasticamente de tal forma que a sua ponta fundiu completamente após apenas 1,53 m de usinagem. Como na usinagem a seco houve um acréscimo muito acentuado na força logo

no primeiro metro de furação com a broca A6 e também o colapso prematuro das ferramentas A2 e A6, conclui-se que a resistência térmica do material destas ferramentas seja insuficiente para se trabalhar em condições tão elevadas de temperatura.

A furação utilizando emulsão apresentou os menores valores de força dentre todas as ferramentas ensaiadas, apesar de possuir os maiores valores de $VB_{máx}$ como mostrado no item 4.1.1. O poder refrigerante deste produto pode ter preservado a capacidade de corte da ferramenta por mais tempo pois a temperatura gerada no processo provavelmente não foi tão elevada quanto nas outras condições. Segundo Subramanian et al. [27], a força deve aumentar acompanhando a evolução do desgaste da ferramenta, porém isto não ocorreu nos seis primeiros metros de furação com a broca A3. Mais uma vez, os menores valores de força axial na usinagem com emulsão podem ser relacionados à temperatura mais baixa devido à redução do fator de recalque [75].

Nas duas condições em que se utilizou a técnica de minimização, a usinagem com óleo vegetal apresentou valores intermediários de força, enquanto que a usinagem com óleo mineral ocasionou os maiores valores. Este comportamento pode estar associado a uma melhor lubrificação e a maiores temperaturas que levam ao aumento do fator de recalque e que, por sua vez, contribuem para o aumento da força axial. Tomando como referência os valores no comprimento final de ensaio (15 m) conclui-se que o valor de F_x na usinagem com emulsão foi aproximadamente 15% menor do que o valor na usinagem com óleo mineral e 5% menor do que com óleo vegetal. Já comparando os dois óleos aplicados em MQFC, o óleo vegetal apresentou valores de F_x aproximadamente 10% menores do que os apresentados na furação com óleo mineral.

4.1.3 Momento Torçor Médio



Momento torçor médio X L_{usinado}
 Ferramenta A; Aço-rápido; A1211; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

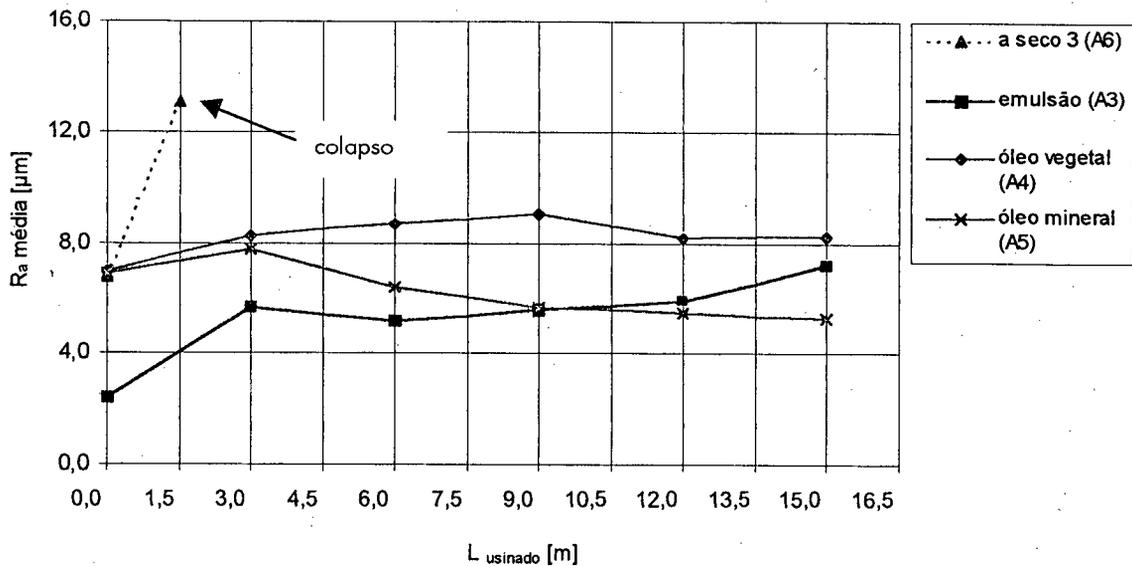
FIGURA 44 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) em todas as condições ensaiadas.

A análise do momento torçor mostra que para a ferramenta que usinou a seco (A6), este apresentou os menores valores com a broca nova. Porém, o crescimento deu-se de forma extremamente rápida levando-a ao colapso prematuro (Fig. 44) o que pode ter sido causado pelo aumento da temperatura e piora da capacidade de corte.

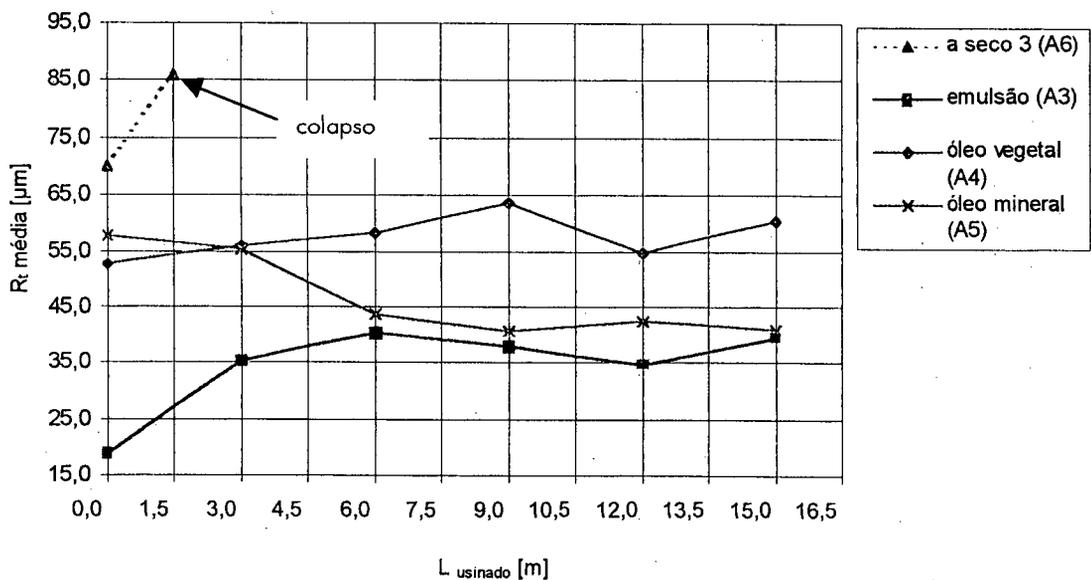
A furação com emulsão apresentou valores do momento torçor um pouco menores, (aproximadamente 5%) do que nos casos onde usinou-se com MQFC. Este comportamento de certa forma não era esperado pois um produto com boa capacidade de lubrificação geralmente leva a menores valores de M_t e a emulsão destaca-se mais pelo seu poder refrigerante.

As ferramentas A4 (óleo vegetal) e A5 (óleo mineral), que usinaram com MQFC, apresentaram comportamento muito similar na evolução da curva, não sendo possível observar diferenças significativas entre os resultados. Nos dois casos ocorre um ligeiro crescimento dos valores de M_t até os 3 m, seguido de uma certa estabilização e finalmente de um decréscimo.

4.1.4 Rugosidades R_a e R_t



Rugosidade R_a média X $L_{usinado}$
 Ferramenta A - AR A1211; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040



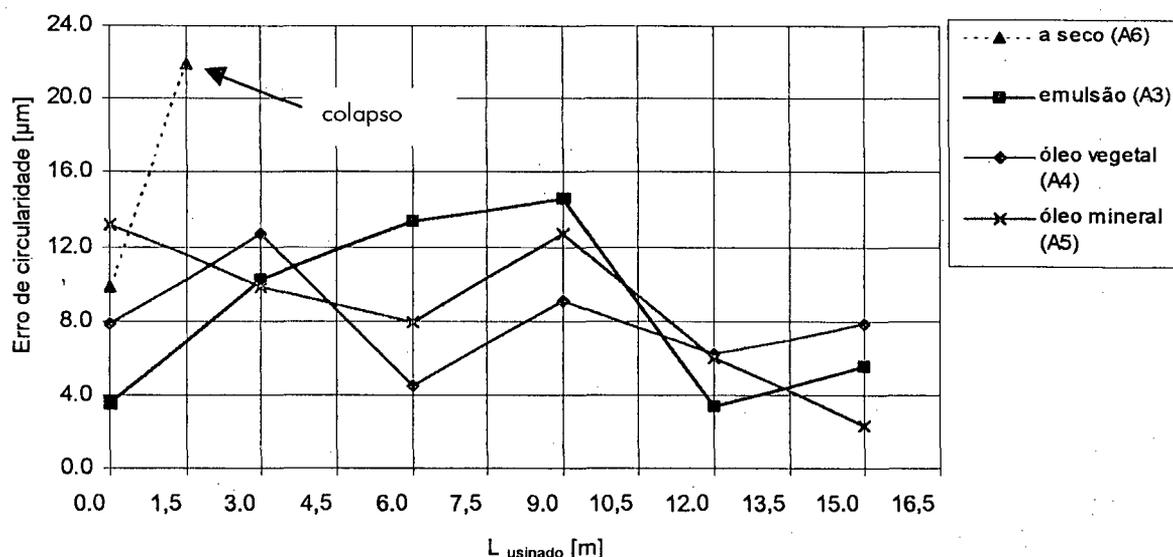
Rugosidade R_t média X $L_{usinado}$
 Ferramenta A - AR A1211; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 45 – Tendência de evolução das rugosidades R_a e R_t dos furos para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) em todas as condições ensaiadas.

Analisando os gráficos da figura 45 percebe-se que na usinagem a seco a ferramenta A6 apresentou nos primeiros 1,5 m de furação os maiores valores de R_a e R_t . Este fato pode ser associado ao colapso prematuro da ferramenta, pois provavelmente a mesma já usinava com os gumes em condições precárias. A broca A3 (emulsão) gerou os menores valores de R_a até os 9 m, sendo superada a partir deste ponto pela broca A5 (óleo mineral). Os valores registrados de R_t porém, foram sempre os menores durante os ensaios. Segundo Tönshoff et al. [4], a aplicação da emulsão melhora o acabamento superficial durante um período longo de utilização deste produto.

Com a minimização de fluido de corte a broca A4 apresentou um comportamento relativamente estável em relação aos valores de R_a . Já no caso da broca A5, nota-se um redução gradativa de R_a e R_t a partir dos 3 m de usinagem tendo esta broca o melhor desempenho dentre as ferramentas que usinaram com MQFC. A possibilidade de se obter uma melhor qualidade superficial com a utilização do óleo mineral do que com o óleo vegetal também é apresentada por Koepfer [80]. Praticamente em todas as condições, com exceção da usinagem a seco, os níveis de rugosidade mantêm-se em faixa de valores estáveis, o que é essencial na produção. Portanto conclui-se que todos os meios estudados são confiáveis neste sentido.

4.1.5 Erro de Circularidade

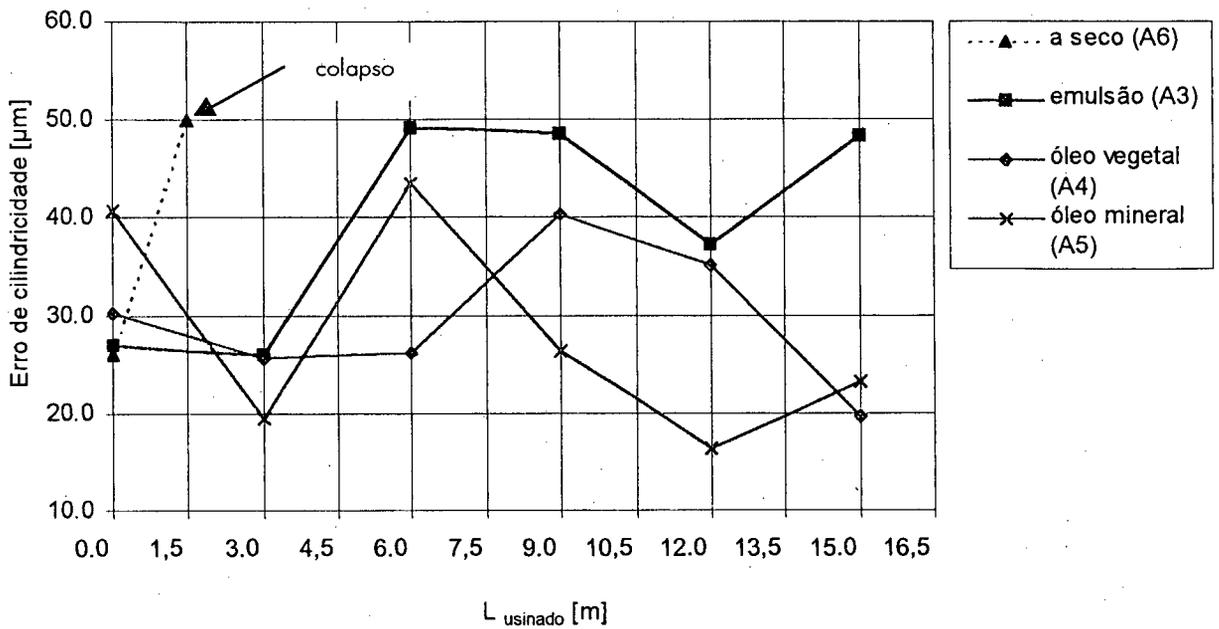


Erro de circularidade X L_{usinado}
 Ferramenta A - AR A1211; DIN338
 d=10 mm; v_c=32 m/min; f=0,185 mm; n=1018 rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 46 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) nas condições ensaiadas.

Nenhuma das condições ensaiadas mostrou um comportamento diferenciado na evolução dos erros de circularidade, com exceção da usinagem a seco, que apresentou um crescimento muito acentuado, atingindo o maior valor dentre todas as condições ensaiada já a 1,5 m de usinagem.

4.1.6 Erro de Cilindricidade

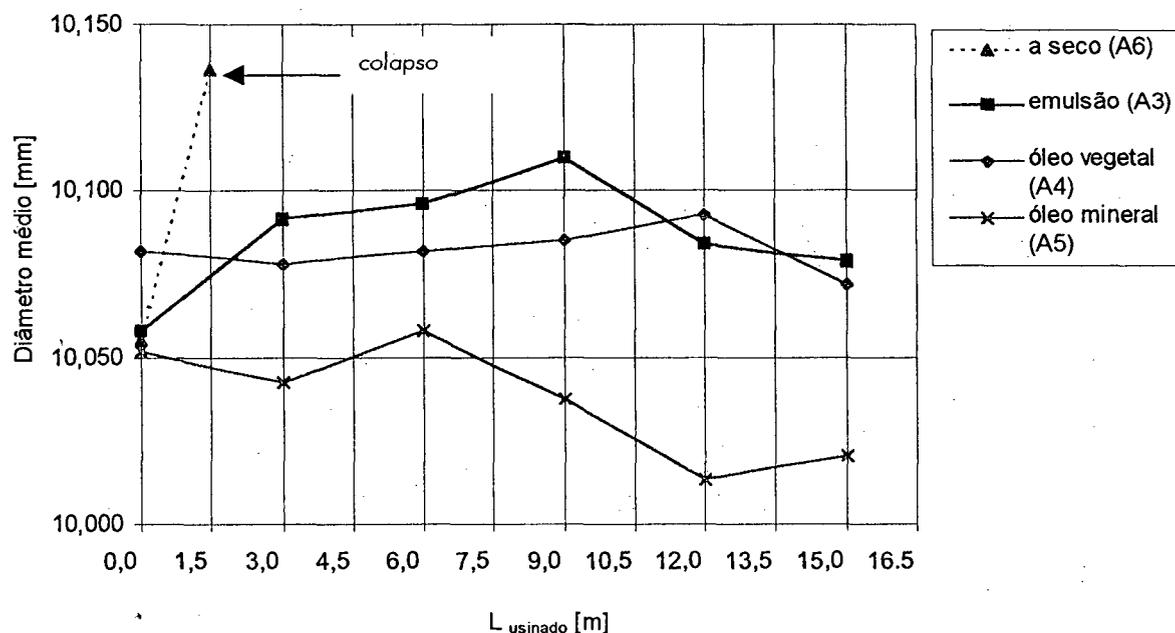


Erro de cilindridade X $L_{usinado}$
 Ferramenta A – AR A1211; DIN338
 $d=10\text{ mm}$; $v_c=32\text{ m/min}$; $f=0,185\text{ mm}$; $n=1018\text{ rpm}$
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 47 – Tendência de evolução do erro de cilindridade dos furos para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) nas condições ensaiadas.

Como no caso anterior (circularidade) o comportamento das curvas mostradas na figura acima não permite determinar qual condição de lubrificação e refrigeração gerou os melhores resultados em termos de cilindridade dos furos.

4.1.7 Diâmetro Médio do Furo



Diâmetro médio X L_{usinado}
 Ferramenta A – AR A1211; DIN338
 $d=10 \text{ mm}$; $v_c=32 \text{ m/min}$; $f=0,185 \text{ mm}$; $n=1018 \text{ rpm}$
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 48 – Tendência de evolução do diâmetro médio dos furos para as ferramentas de aço-rápido sem revestimento (lote A) nas condições ensaiadas.

A figura 48 mostra que a usinagem com MQFC utilizando óleo mineral apresentou os valores dos diâmetros médios dos furos mais próximos do diâmetro nominal, estando estes dentro da classe IT10 de tolerância dimensional. Na usinagem com óleo vegetal, verificam-se valores dos diâmetros dos furos durante todo o ensaio dentro dos limites da classe IT8, sendo estes os melhores resultados obtidos com este lote de ferramentas. Na usinagem com emulsão obtiveram-se valores próximos aos obtidos na usinagem com óleo mineral, ou seja, também dentro da classe IT10. Todos os resultados apresentados podem ser considerados satisfatórios, pois na furação com brocas helicoidais de aço-rápido espera-se a produção de furos dentro da classe IT12 [4].

ferramenta é resfriada abruptamente por um jato de emulsão, e este processo é repetido a cada ciclo de furação. Já para Klocke e Eisenblätter [9], a abrasão é o mecanismo predominante no desgaste de flanco quando se usina em baixas velocidades de corte, como a que foi empregada neste experimento.

A furação a seco com brocas de aço-rápido sem revestimento mostrou-se inviável pois neste caso as elevadas temperaturas do cavaco podem dificultar e até mesmo impedir a sua saída do furo. Isto leva ao entupimento dos canais helicoidais, ocorrendo adesões de cavacos na parede do furo e até mesmo o colapso prematuro da ferramenta [9, 29]. A elevada carga térmica a que são submetidas as ferramentas na furação do aço exige que o seu material tenha elevada dureza a quente e resistência ao desgaste [29]. A resistência do aço-rápido sem revestimento mostrou-se insuficiente para poder cumprir estas duas exigências.

4.2 Ferramentas de Aço-rápido com Revestimento de Nitreto de Titânio – A1211TiN – Fabricante B (Lote B)

Foram ensaiadas cinco ferramentas, das quais duas usinaram a seco para se poder ter uma melhor confirmação do seu comportamento nesta condição. Os códigos e as condições de usinagem utilizados são mostradas na tabela 9.

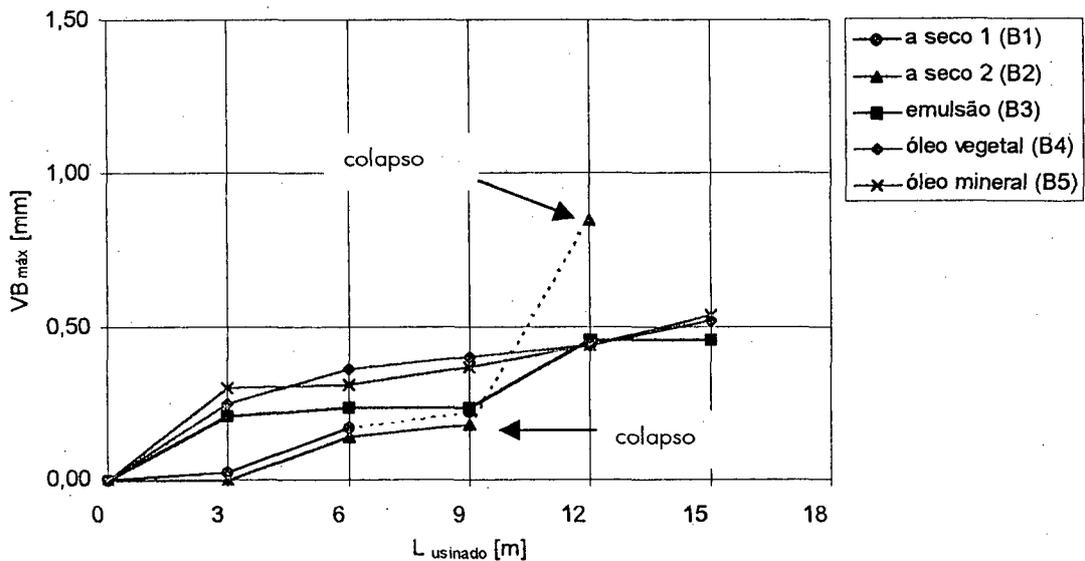
TABELA 9 – Ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (Lote B).

Código	Condição
B1	A seco
B2	A seco
B3	Emulsão
B4	MQFC – óleo vegetal
B5	MQFC – óleo mineral

De todas as ferramentas do lote B, apenas as ferramentas ensaiadas a seco não chegaram no comprimento final de usinagem programado. Ambas as ferramentas, B1 e B2, sofreram o colapso catastrófico, aos 9 e 13,11 m de usinagem, respectivamente. Em ambos

os casos a quebra das ferramentas ocorreu aproximadamente no meio da broca, levando a crer que o material não apresentava resistência mecânica suficiente.

4.2.1 Desgaste de Flanco Máximo

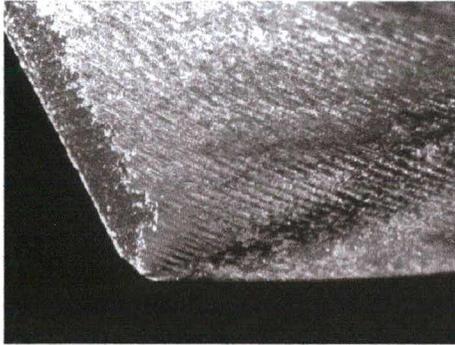


Desgaste de Flanco $VB_{\max} \times L_{\text{usinado}}$
 Ferramenta B; AR A1211TiN; DIN338
 $d=10 \text{ mm}$; $v_c=32 \text{ m/min}$; $f=0,185 \text{ mm}$; $n=1018 \text{ rpm}$
 Material da peça: aço ABNT1040

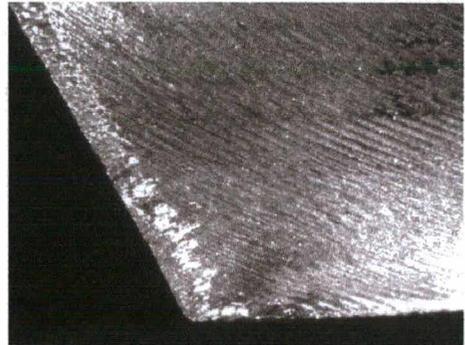
FIGURA 50 – Tendência de evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas as condições ensaiadas.

Analisando a figura 50, percebe-se que as ferramentas que usinaram a seco (B1 e B2), apresentaram as menores marcas de desgaste máximo de flanco até os 9 m de usinagem. Porém, após este ponto as ferramentas sofreram colapso catastrófico, não atingindo o próximo comprimento de usinagem programado (12 m). A partir dos 9 m o desgaste do revestimento fez com que a ferramenta começasse a se comportar como uma de aço-rápido não-revestida. Este fenômeno também foi constatado por Subramanian et al. [27], imediatamente após a usinagem do primeiro furo. Percebe-se na figura 51b que apesar de ter usinado três metros a mais que a broca B2 (a seco), a broca B4 (óleo vegetal) ainda conserva o revestimento mesmo já apresentando um certo desgaste na face. Já a

broca B2 o perdeu completamente (Fig. 51a). Por este motivo a evolução de $VB_{máx}$ deu-se de forma mais acentuada, levando em seguida a ferramenta ao colapso.



a) Face da broca B2 (a seco) aos 12 m



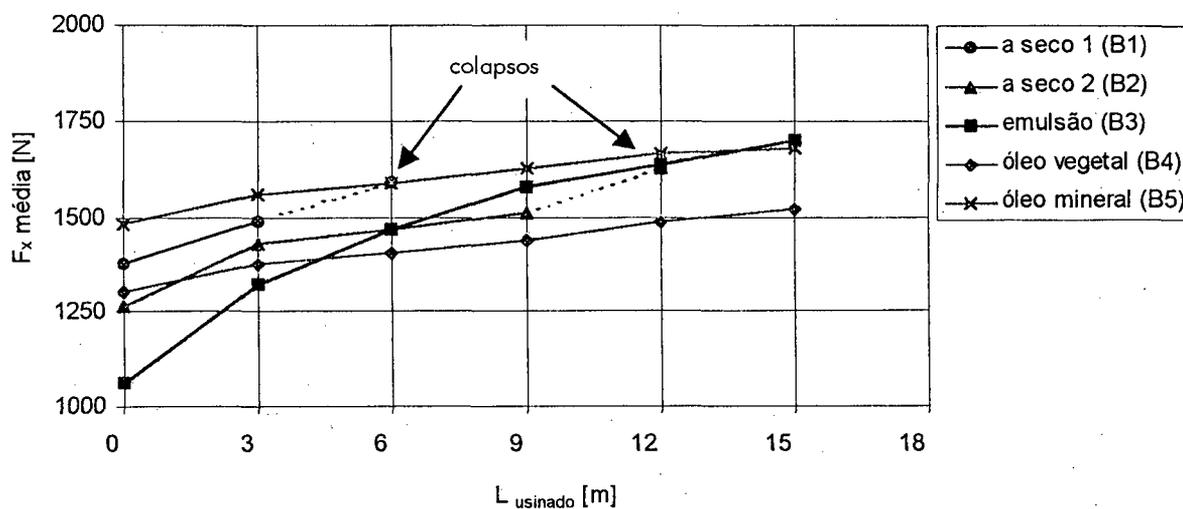
b) Face da broca B4 (óleo vegetal) aos 15 m

FIGURA 51 – Face das ferramentas B2 (a seco) e B4 (óleo vegetal) aos 12 e 15 m, respectivamente.

A ferramenta que utilizou emulsão como meio lubri-refrigerante apresentou uma certa estabilização e valores de $VB_{máx}$ menores entre os 3 e 9 m que os das ferramentas ensaiadas com MQFC. Logo após este ponto, houve uma rápida evolução seguida novamente de uma estabilização do desgaste máximo de flanco. De forma geral, pode-se afirmar que dentre as ferramentas que atingiram o comprimento final de usinagem, a B3 foi a que apresentou os menores valores de $VB_{máx}$, mesmo sendo estes muito próximos dos valores apresentados nas outras condições.

Nos casos onde usinou-se com MQFC, a tendência de crescimento do $VB_{máx}$ tanto no uso do óleo mineral quanto do vegetal foi praticamente igual, tornando difícil afirmar qual delas teve o melhor desempenho.

4.2.2 Força Axial Média



Força axial média X L_{usinado}
 Ferramenta B; AR A1211TiN; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

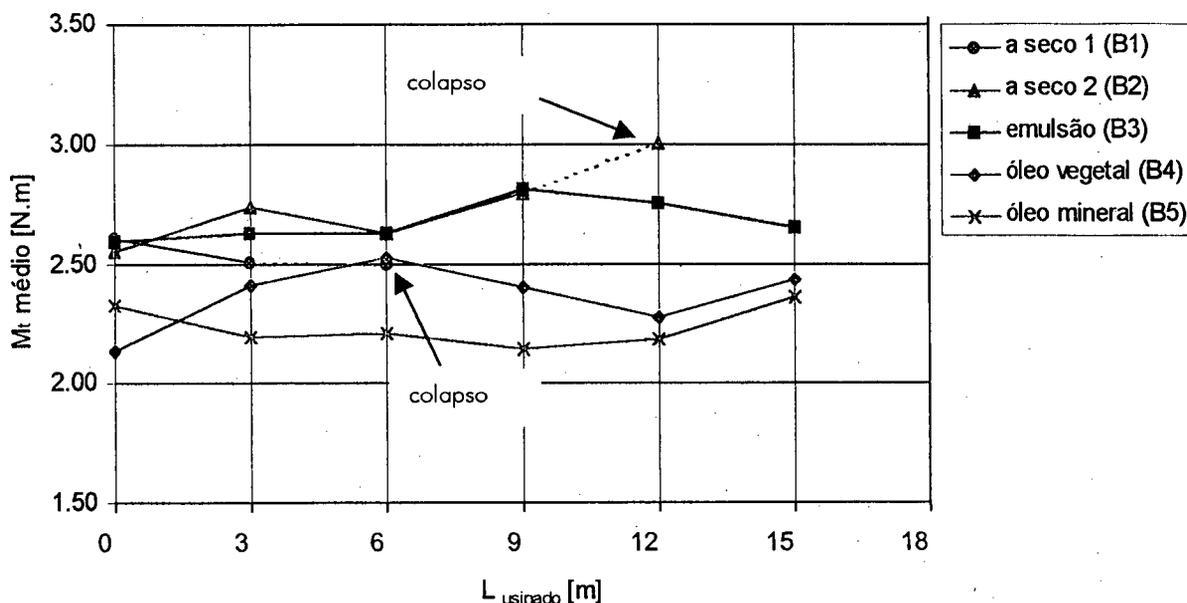
FIGURA 52 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas condições ensaiadas.

A figura 52 mostra que o comportamento e os valores apresentados de F_x em todas as condições ensaiadas foram muito similares. Mesmo assim, a ferramenta B2 apresentou um crescimento de F_x mais acentuado e o mesmo acompanha a evolução repentina de $VB_{\text{máx}}$ momentos antes do colapso (Fig. 50). Este tipo de comportamento já foi descrito em outros trabalhos, como o de Subramanian et al. [27] e de Weingaertner et al. [70]. A broca B3 nos quatro primeiros metros de usinagem apresentou os menores valores de força axial porém estes cresceram de forma mais acentuada do que as outras condições ensaiadas desde o início até atingir os 15 m.

Nos ensaios realizados com MQFC, as ferramentas B4 e B5 mostraram-se similares na tendência de crescimento da força axial média durante a usinagem. A broca que utilizou óleo vegetal como meio lubri-refrigerante gerou, dentre todas as condições ensaiadas, os menores valores de F_x após os quatro primeiros metros de furação. Mesmo assim esta

diferença não foi tão intensa pois aos 15 m os valores de F_x na usinagem com óleo vegetal não chega a ser 10% menor do que nas outras condições.

4.2.3 Momento Torçor Médio



Momento torçor médio X L_{usinado}
 Ferramenta B; AR A1211 TiN; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

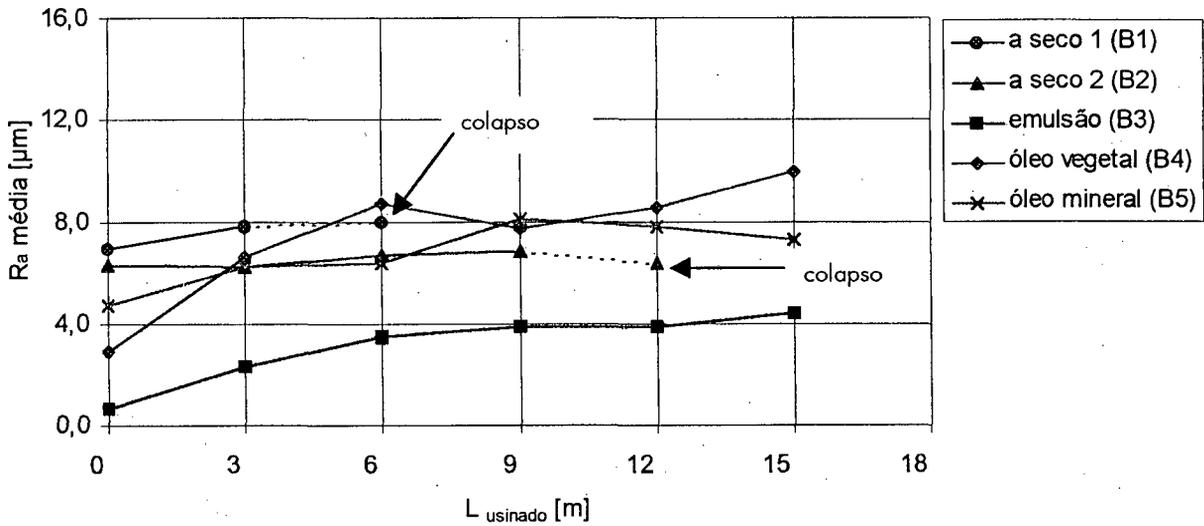
FIGURA 53 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas as condições ensaiadas.

A figura 53 mostra que apesar de apresentarem praticamente o mesmo valor de M_t com a broca nova e terem usinado nas mesmas condições, a evolução da curva das brocas B1 e B2 deu-se de forma diferente. Para a broca B1 houve uma leve redução do M_t , já para a B2 um crescimento acentuado instantes antes do colapso.

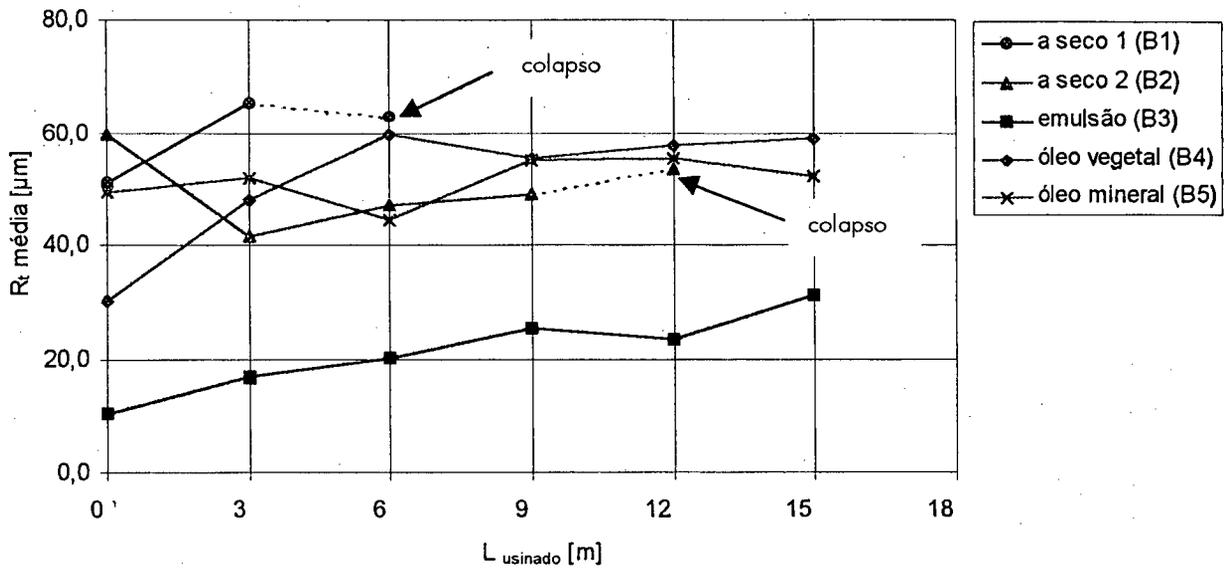
A usinagem com emulsão apresentou uma certa estabilidade nos primeiros metros de usinagem, seguido de um breve crescimento entre 6 e 9 metros e redução do M_t a partir dos 9 m. Se comparados com as brocas que usinaram com MQFC, os valores de M_t na usinagem com emulsão foram maiores durante todo o período de ensaio.

As ferramentas que foram ensaiadas com MQFC apresentaram os menores valores de M_r . Neste caso acredita-se que o poder lubrificante dos óleos contribuiu na redução do atrito entre as guias laterais e parede do furo de forma eficiente principalmente a partir dos 6 m. Dentre as todas as condições ensaiadas, a broca B5 (óleo mineral) foi a que apresentou os menores valores durante os ensaios, seguida da broca B4 (óleo vegetal).

4.2.4 Rugosidades R_a e R_t



Rugosidade R_a média X $L_{usinado}$
 Ferramenta B; AR A1211TiN; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040



Rugosidade R_t média $\times L_{\text{usinado}}$
 Ferramenta B; AR A1211TiN; DIN338
 $d=10 \text{ mm}$; $v_c=32 \text{ m/min}$; $f=0,185 \text{ mm}$; $n=1018 \text{ rpm}$
 Material da peça: aço ABNT1040

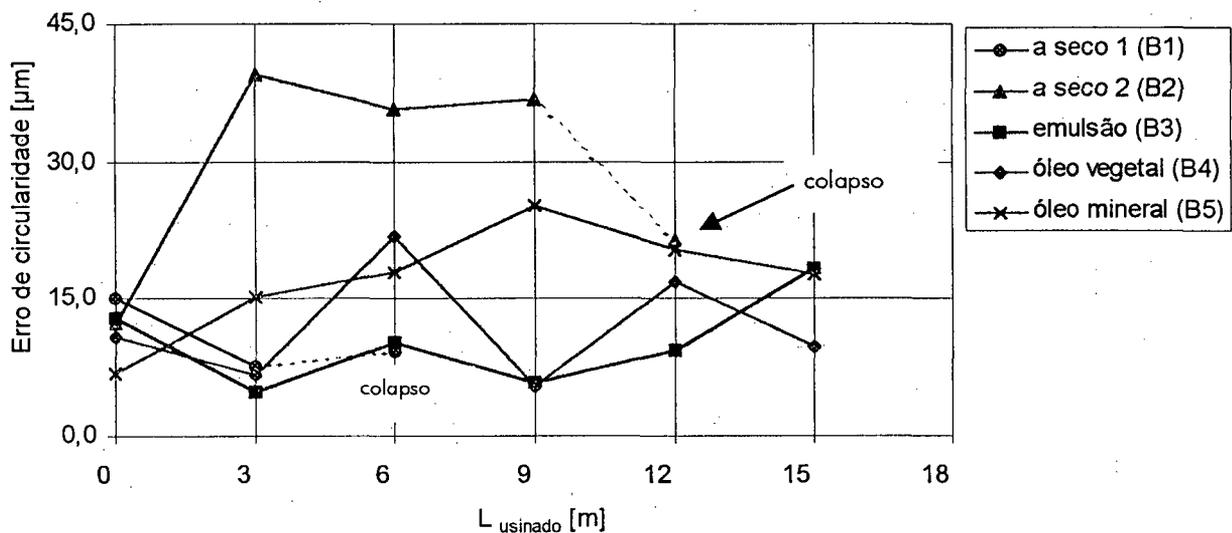
FIGURA 54 – Tendência de evolução das rugosidades R_a e R_t dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas as condições ensaiadas.

Apesar de terem quebrado prematuramente (Fig. 54), as ferramentas que foram ensaiadas a seco, permitiram a obtenção de valores de R_a e R_t próximos aos valores das ferramentas que usinaram com MQFC.

Com a broca B3 (emulsão) ocorreram os menores valores de rugosidade desde o início dos ensaios. Estes foram bem abaixo dos gerados nas furações realizadas com as outras ferramentas. O poder refrigerante da emulsão [4] juntamente com a favorecimento da retirada dos cavacos dos furos pelo jato do produto podem ter sido os fatores responsáveis para o bom desempenho desta ferramenta em termos de rugosidade. Segundo Weinert e Adams [45], as guias laterais influenciam na geração da superfície do furo. Sendo assim, pode-se dizer que outro fator que possivelmente contribuiu para os menores valores de rugosidade foi o estado de conservação das guias laterais da ferramenta B3 durante o ensaio.

Na furação com MQFC o comportamento evolutivo das rugosidades foi semelhante em ambos os casos, porém nos primeiros metros a usinagem com óleo vegetal (B4) gerou menores valores tanto de R_a como de R_r . Nos últimos metros (12-15 m), a usinagem com óleo mineral mostrou-se ligeiramente melhor.

4.2.5 Erro de Circularidade

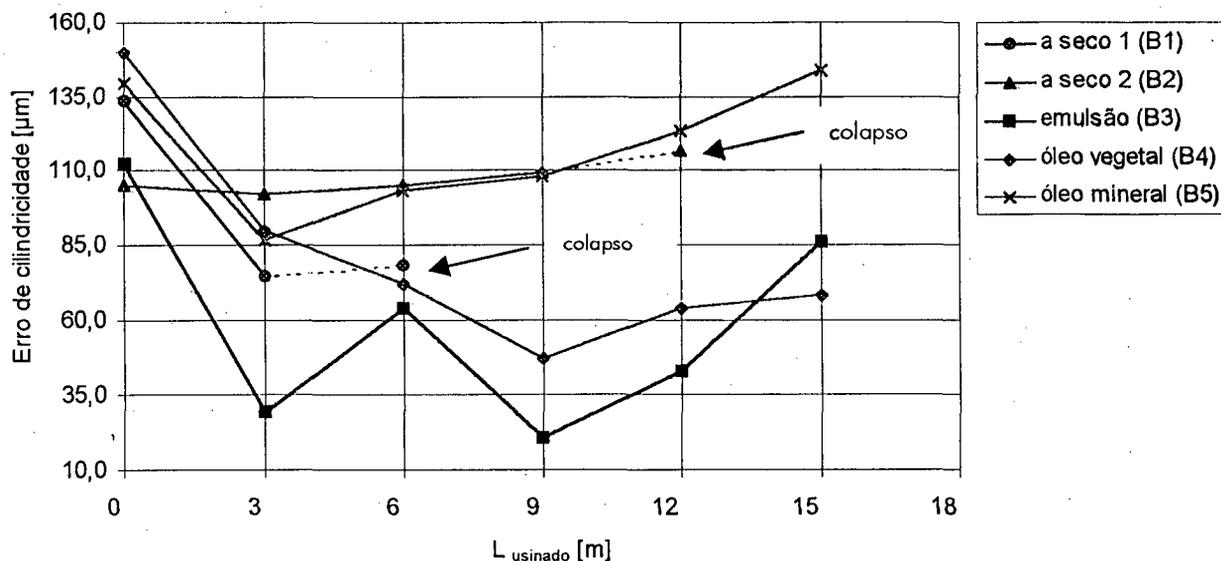


Erro de circularidade X L_{usinado}
 Ferramenta B; AR A1211TiN; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 55 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas as condições ensaiadas.

A figura 55 mostra que na usinagem a seco as duas ferramentas apresentaram comportamentos distintos na evolução do erro de circularidade. A broca B1 gerou valores baixos e comparáveis com os valores gerados na usinagem com emulsão. Já a B2 apresentou um crescimento acentuado nos 3 primeiros metros, com valores muito acima dos gerados nas outras condições de usinagem. Pode-se dizer que a usinagem com emulsão foi a que gerou maiores benefícios na redução do erro de circularidade, sendo seguida pela usinagem com óleo mineral. Na usinagem com óleo vegetal, apesar dos valores serem relativamente baixos, estes sofreram muita variação durante a usinagem.

4.2.6 Erro de Cilindricidade

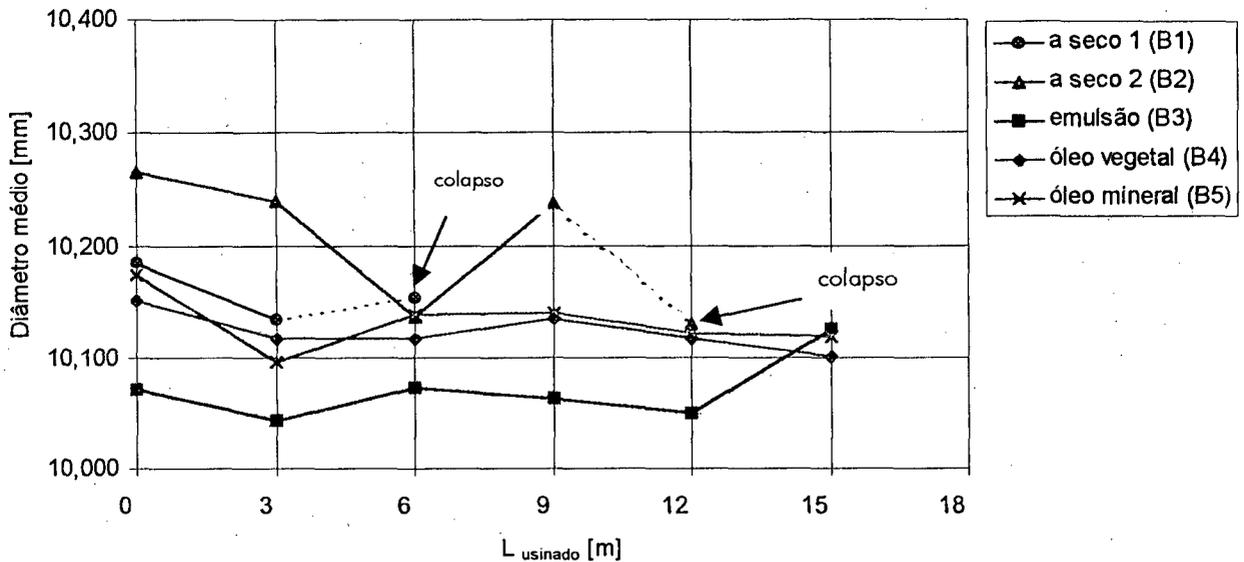


Erro de cilindridade X L_{usinado}
 Ferramenta B; AR A1211TiN; DIN338
 d=10 mm; v_c=32 m/min; f=0,185 mm; n=1018 rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 56 – Tendência de evolução do erro de cilindridade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas as condições ensaiadas.

A furação utilizando emulsão, como nos casos anteriores (rugosidade e circularidade), apresentou os menores erros de cilindridade, porém com flutuações nos resultados principalmente nos 9 primeiros metros. A condição a seco mais uma vez apresentou diferença no comportamento evolutivo da curva, onde a broca B2 mostrou mais constância nos resultados. O decréscimo acentuado dos valores nos 3 primeiros metros, exceto para a broca B2, é uma característica que deve ser melhor investigada. Dentre as condições que utilizaram a técnica de minimização de fluido de corte, a que empregou o óleo vegetal trouxe melhores resultados.

4.2.7 Diâmetro Médio do Furo



Diâmetro médio X L_{usinado}
 Ferramenta B; AR A1211TiN; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 57 – Tendência de evolução do diâmetro médio dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote B) em todas as condições ensaiadas.

Dentre todas as condições ensaiadas, a furação onde se utilizou emulsão gerou os melhores resultados em termos da variação do diâmetro médio do furo, estando estes dentro da classe IT9 de tolerância dimensional. Segundo Tönshoff et al. [4], IT12 é normalmente a tolerância alcançada com este tipo de ferramenta. A refrigeração proporcionada pela emulsão, segundo Tönshoff et al. [4], auxilia a reduzir quaisquer diferenças no diâmetro que ocorram ao longo da vida da ferramenta. A furação realizada com a broca B2 apresentou valores de diâmetro superiores aos das outras condições e com grande variação ao longo da usinagem (até o momento do colapso), estando dentro da classe IT12. Porém, estes valores estão de acordo com a faixa de tolerância esperada na furação com brocas de aço-rápido. Na usinagem com MQFC o desempenho de B4 e B5 gerou valores dentro da classe IT10 e IT11, respectivamente.

4.2.8 Considerações sobre os Resultados

Em termos de qualidade de processo, pode-se dizer que a broca que usinou com o auxílio da emulsão apresentou os melhores resultados, seguida das usinagens com MQFC. O revestimento de TiN não se mostrou tão eficiente a ponto de levar a ferramenta até o comprimento final programado quando usinando a seco. Assim que o revestimento é desgastado o material do substrato da ferramenta é exposto e a mesma começa a se comportar como uma ferramenta de aço-rápido não-revestida. Os mecanismos de desgastes como abrasão, adesão, fadiga térmica e mecânica começam a influenciar negativamente na vida da ferramenta podendo levá-la ao colapso catastrófico, como já constatado por Subramanian et al. [27]. Já na usinagem com MQFC os resultados obtidos foram satisfatórios, mostrando ser uma alternativa viável quando se utilizam ferramentas de aço-rápido revestidas com nitreto de titânio.

4.3 Ferramentas de Aço-rápido com Revestimento de Nitreto de Titânio – 651TiN – Fabricante A (Lote D)

Foram utilizadas cinco ferramentas das quais duas usinaram a seco e, como nos casos anteriores, foram ensaiadas nesta condição para uma melhor confirmação do comportamento. Os códigos e as condições de usinagem de cada ferramenta são mostradas na tabela 10.

TABELA 10 – Ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (Lote D).

Código	Condição
D1	A seco
D2	A seco
D3	Emulsão
D4	MQFC – óleo vegetal
D5	MQFC – óleo mineral

Dentre as ferramentas do lote D, a ferramenta D1 ensaiada a seco não chegou ao comprimento final de usinagem, entrando em colapso aos 9 m de usinagem após ter

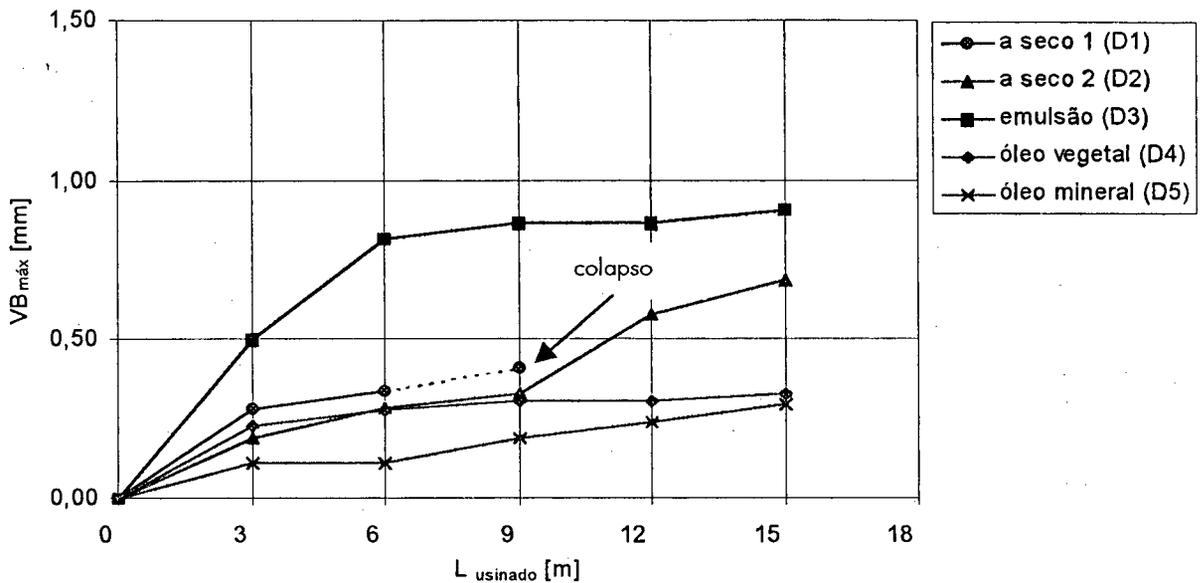
começado a vibrar. Possivelmente o surgimento de um pequeno lascamento em uma das guias laterais e na respectiva quina da ferramenta momentos antes do início da vibração tenha levado-a ao colapso prematuro. Neste caso o colapso deu-se de modo diferente do ocorrido com as ferramentas B1 e B2 do lote anterior, que são geometricamente idênticas porém de fabricantes diferentes. A ponta da broca D1 fundiu-se enquanto que a B1, por exemplo, quebrou ao meio (Fig. 58).



FIGURA 58 – Estado final das brocas D1 e B1 após o colapso.

Deste modo, repetiu-se o ensaio a seco com a ferramenta D2 e esta ferramenta chegou aos 15 m de usinagem. As ferramentas do lote D, apesar de serem do mesmo material e utilizarem o mesmo tipo de revestimento, diferem das brocas do lote B analisadas anteriormente na geometria e no fabricante.

4.3.1 Desgaste de Flanco Máximo



Desgaste de flanco $VB_{\text{máx}} \times L_{\text{usinado}}$
 Ferramenta D; AR/TiN 651; DIN338
 $d=10 \text{ mm}$; $v_c=32 \text{ m/min}$; $f=0,185 \text{ mm}$; $n=1018 \text{ rpm}$
 Material da peça: aço ABNT1040

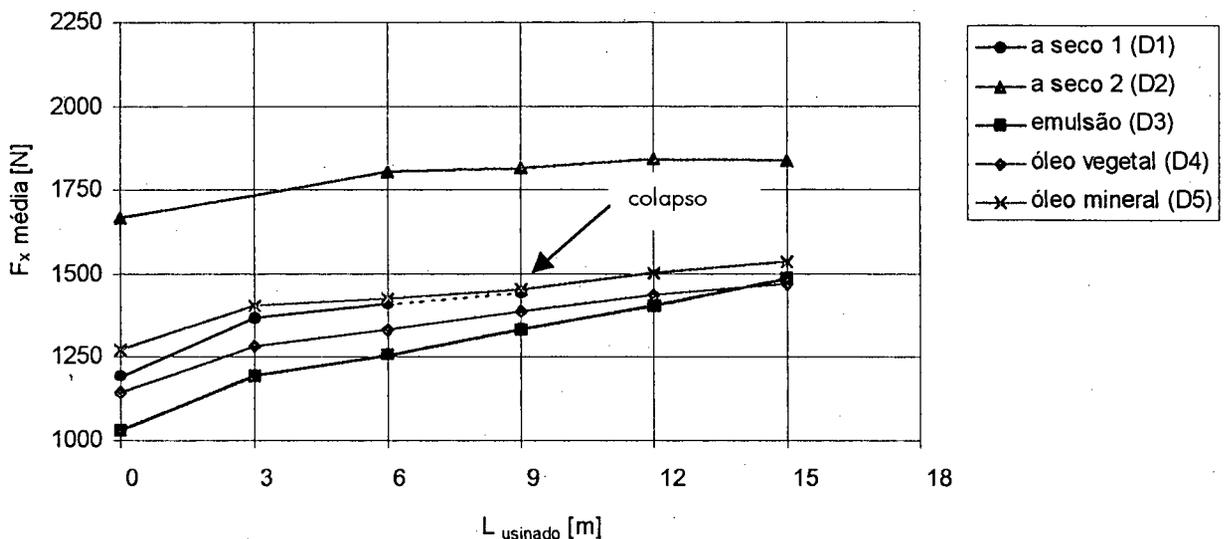
FIGURA 59 – Tendência de evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas.

Analisando os resultados mostrados na figura 59, percebe-se que as ferramentas que usinaram a seco apresentaram um comportamento semelhante até o momento em que houve o colapso da ferramenta D1. A partir deste ponto (9 m), os valores de $VB_{\text{máx}}$ de D2 foram menores apenas do que os valores apresentados na usinagem com emulsão (D3). Na usinagem com emulsão (D3) o desgaste de flanco apresentou desde o início os maiores valores dentre todas as condições ensaiadas. Houve um rápido crescimento até os 6 m, e a partir deste ponto uma pequena evolução do $VB_{\text{máx}}$.

Na furação com MQFC, a broca D5 (óleo mineral) apresentou os menores valores de $VB_{\text{máx}}$ dentre as quatro condições ensaiadas durante todo o comprimento de usinagem programado. Já a broca D4 (óleo vegetal) apresentou um comportamento evolutivo do desgaste de flanco similar ao da broca D2 (a seco) até os 9 m. Após este ponto houve uma estabilização no caso da broca D4 enquanto que para a D2 o $VB_{\text{máx}}$ cresceu

acentuadamente. Pode-se dizer que as marcas de desgaste apresentadas pela ferramentas que usinaram com MQFC foram aproximadamente 2 vezes menores do que a verificada na usinagem a seco e 3 vezes da gerada na usinagem com emulsão.

4.3.2 Força Axial Média



Força axial média X L_{usinado}
 Ferramenta D; AR/TiN 651; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

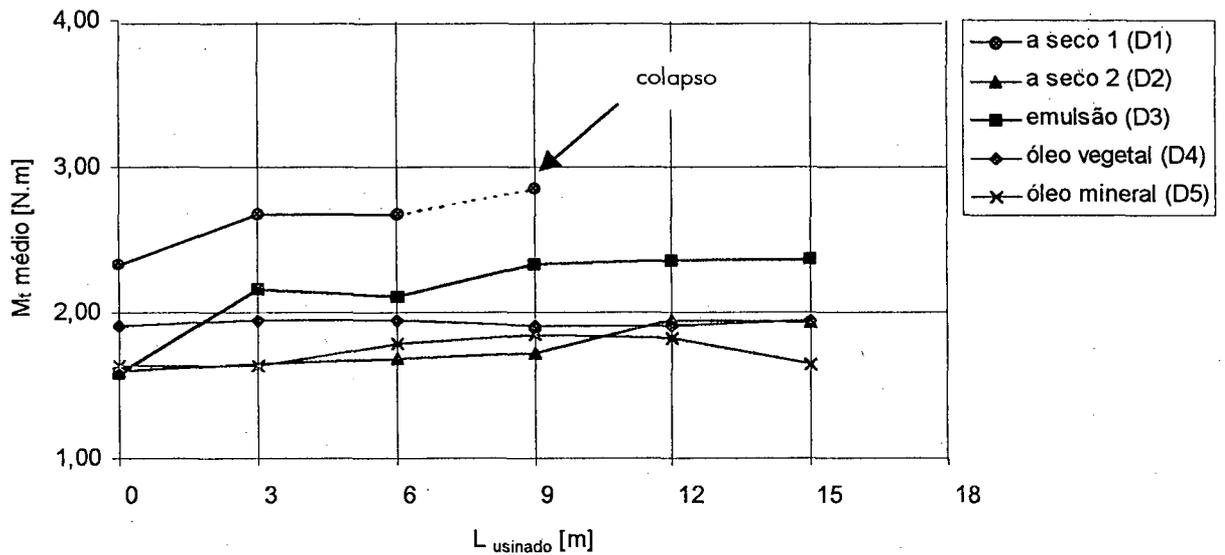
FIGURA 60 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas.

Percebe-se através da figura 60, que as ferramentas D1 e D2, ensaiadas a seco, apresentaram diferença nos valores da F_x média. Isto pode ter ocorrido devido a uma falha operacional dos equipamentos no momento da aquisição dos dados de força. Deveria ser realizado mais um ensaio nesta condição para a verificação destes valores, o que não foi possível pela indisponibilidade de uma ferramenta reserva com as mesmas características. Deste modo, não se pode tirar conclusões sobre o comportamento da força nesta condição.

A furação com emulsão apresentou os menores valores de F_x média dentre todas as condições ensaiadas ao longo dos 15 m de furação. Porém, estes valores ficaram muito próximos aos valores resultantes da usinagem com MQFC. Se o desempenho das duas

ferramentas nas quais utilizou-se a técnica da minimização for confrontado, percebe-se que a usinagem com óleo vegetal mostrou ser levemente superior no que diz respeito à redução da força axial. Mas de um modo geral, os resultados ficaram muito próximos uns dos outros para se poder afirmar que uma das condições de lubrificação e refrigeração levou a resultados muito melhores do que as outras.

4.3.3 Momento Torçor Médio



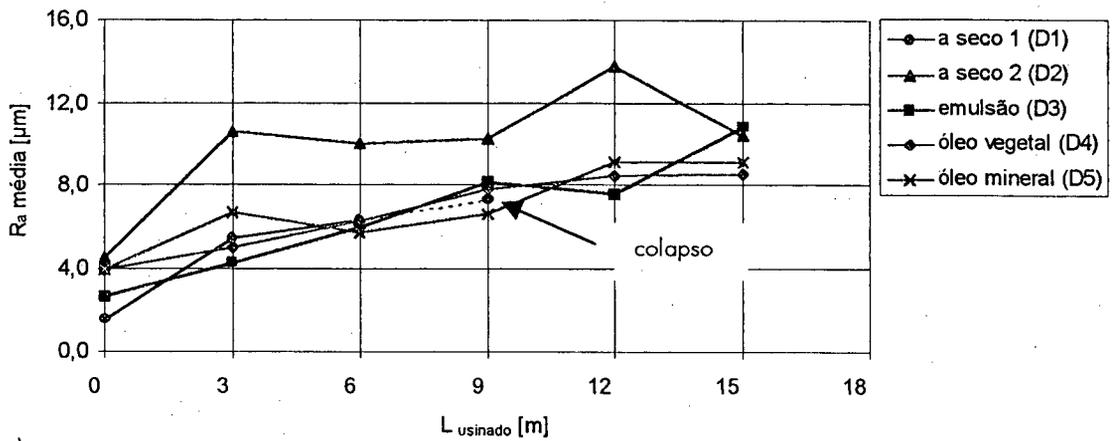
Momento torçor médio X L_{usinado}
 Ferramenta D; AR/TiN 651; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 61 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas.

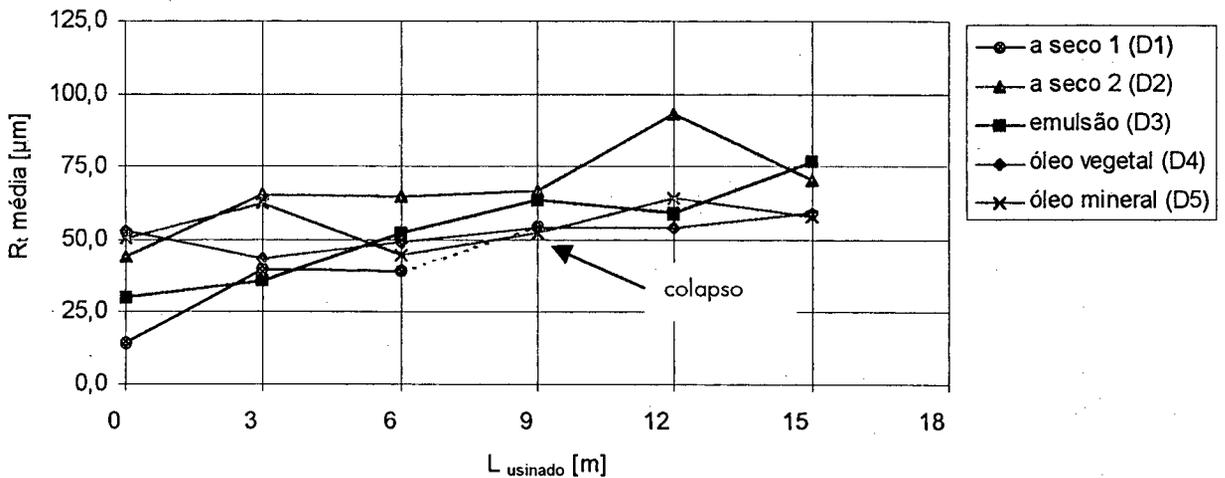
Como discutido no item anterior 4.3.2, acredita-se que houve uma falha operacional na aquisição dos dados das ferramentas ensaiadas a seco (D1 e D2), fato este que pode ser percebido na disparidade dos valores do M_t médio adquiridos nesta condição (Fig. 61). Desta maneira, não se pode tirar conclusões concretas sobre o comportamento do momento na usinagem a seco. A usinagem com emulsão diferencia-se das usinagens realizadas com MQFC por apresentar um crescimento relativamente acentuado nos primeiros três metros de furação, mantendo valores de M_t superiores a partir deste ponto até o fim dos ensaios. Nas

usinagens com MQFC houve uma certa estabilidade do M_f durante os ensaios. Os valores do M_f de D4 e D5 ficaram muito próximos entre si para se poder afirmar que uma ferramenta teve melhor desempenho que a outra.

4.3.4 Rugosidades R_a e R_t



Rugosidade R_a média X $L_{usinado}$
 Ferramenta D; AR/TiN 651; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

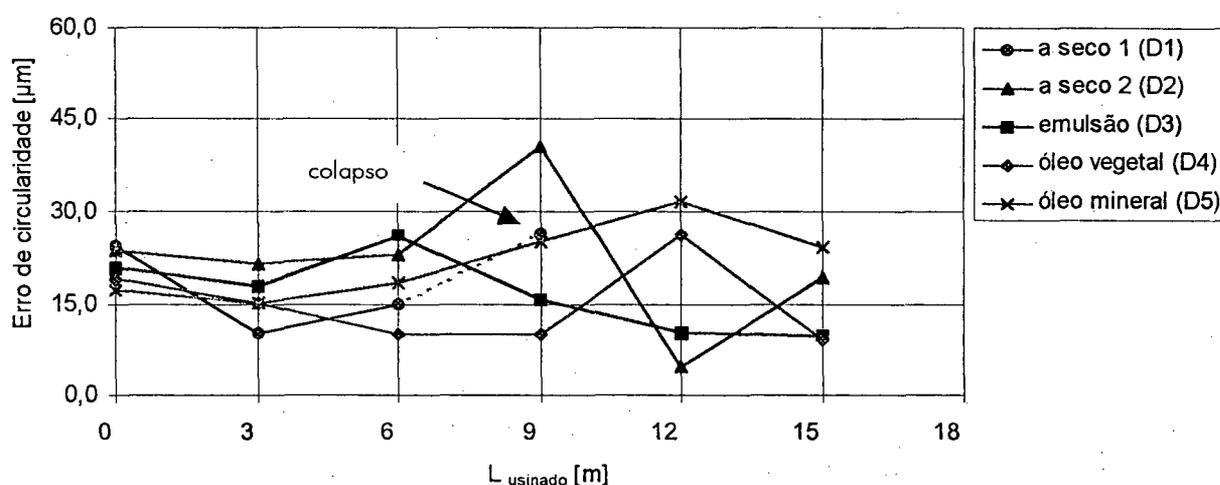


Rugosidade R_t média X $L_{usinado}$
 Ferramenta D; AR/TiN 651; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 62 – Tendência de evolução das rugosidades R_a e R_t dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas.

É difícil, através da análise da figura 62, chegar a uma conclusão sobre qual condição de lubrificação e refrigeração foi mais benéfica em termos de rugosidade. Mesmo assim, percebe-se que a broca D2 que usinou a seco gerou valores de R_a e R_z levemente superiores aos apresentados nas outras condições de ensaio. Entretanto, a broca D1 que também usinou a seco, até o momento do colapso vinha apresentando resultados semelhantes aos das outras condições. Deste modo, não é possível concluir de forma definitiva sobre o desempenho destas ferramentas durante a usinagem a seco. Existe a possibilidade de que neste caso a condição de lubrificação e refrigeração não influencie significativamente a rugosidade. Provavelmente, a diminuição do atrito das guias laterais revestidas sobre a parede do furo explica este fato.

4.3.5 Erro de Circularidade



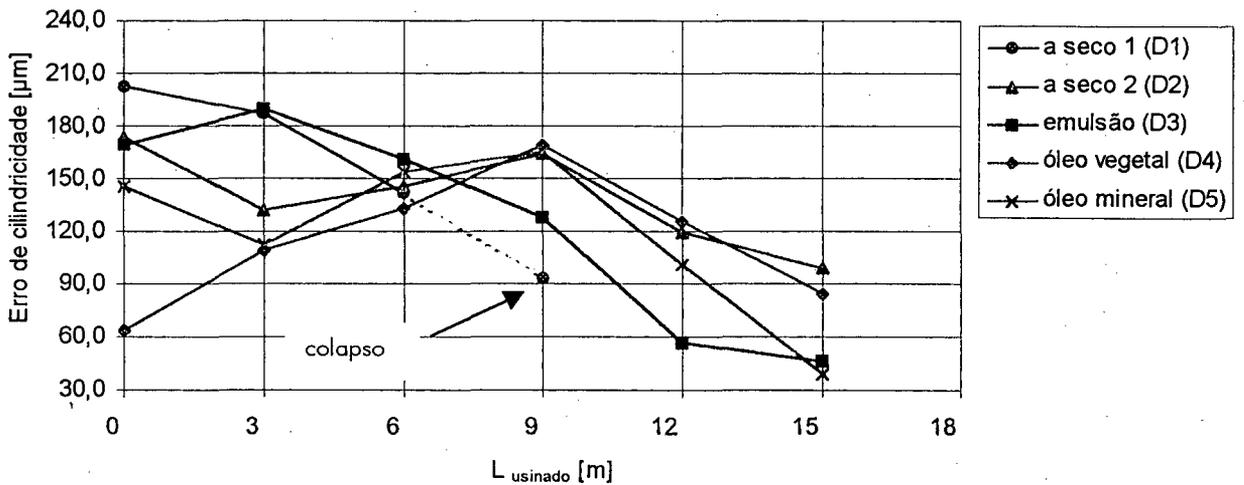
Erro de circularidade X L_{usinado}
 Ferramenta D; AR/TiN 651; DIN338
 d=10 mm; v_c=32 m/min; f=0,185 mm; n=1018 rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 63 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas.

O comportamento evolutivo do erro de circularidade torna-se difícil de ser avaliado através da figura 63. Todas as condições de refrigeração e lubrificação ensaiadas geraram valores muito próximos, principalmente nos seis primeiros metros de usinagem. Além disso,

ocorreram flutuações em algumas curvas durante certos pontos de aquisição de dados. Como na rugosidade, possivelmente a condição de lubrificação e refrigeração não influencia significativamente nos resultados. De certa forma a usinagem empregando emulsão apresentou os menores erros de circularidade a partir dos seis metros de usinagem.

4.3.6 Erro de Cilindricidade

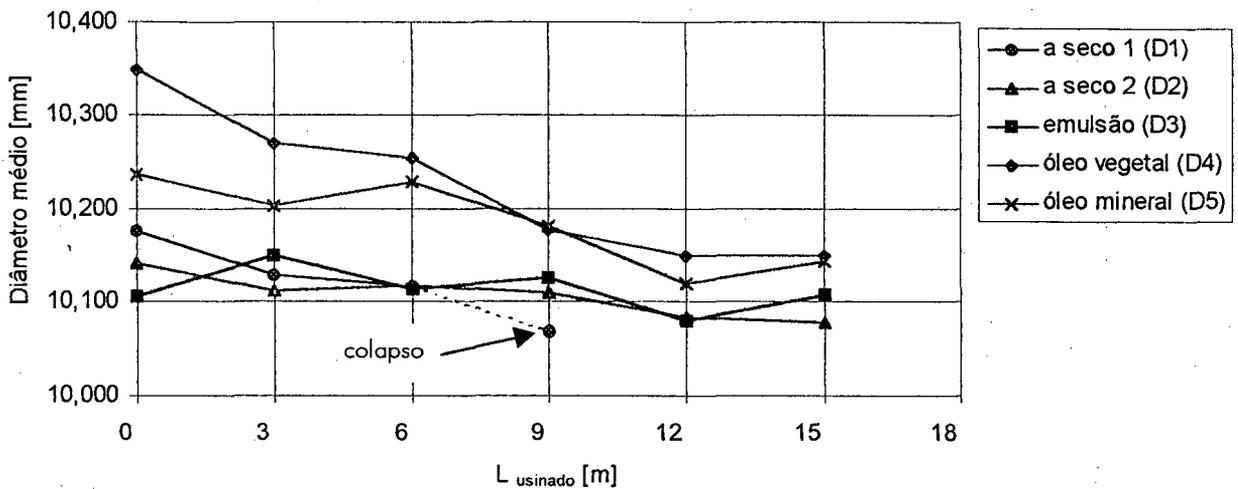


Erro de cilindridade X L_{usinado}
 Ferramenta D; AR/TiN 651; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 64 – Tendência de evolução do erro de cilindridade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas.

Ao ser analisado o erro de cilindridade mostrado na figura 64, observa-se a partir dos 3 m de usinagem que os valores e o comportamento evolutivo da curva são semelhantes para as brocas D2 (a seco), D4 (óleo vegetal) e D5 (óleo mineral). A usinagem com emulsão a partir dos 7 m apresentou os menores erros de cilindridade porém, aos 15 m o erro apresentado foi praticamente igual ao da usinagem com óleo mineral. Observa-se uma flutuação dos valores para ferramentas novas, mas ocorre uma tendência destes valores se aproximarem ao longo do experimento.

4.3.7 Diâmetro Médio do Furo



Diâmetro médio X L_{usinado}
 Ferramenta D; AR/TiN 651; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 65 – Tendência de evolução do diâmetro médio dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN (lote D) em todas as condições ensaiadas.

Ao se fazer a análise do diâmetro médio dos furos (Fig. 65) nota-se que algo interessante aconteceu no ensaio deste lote de ferramentas. Os ensaios em que as condições de lubrificação e refrigeração eram opostas e de certo modo extremas, usinagem a seco (D2) e com emulsão (D3), resultaram em valores de diâmetro médio menores e semelhantes. Estes valores situaram-se dentro da classe de tolerância dimensional IT10. A usinagem com MQFC empregando óleo vegetal (D4) e óleo mineral (D5) gerou os maiores valores de diâmetro médio, estando dentro da classe IT13 e IT12, respectivamente. A classe IT13 está acima da classe de tolerância dimensional esperada na furação com brocas de aço-rápido (IT12).

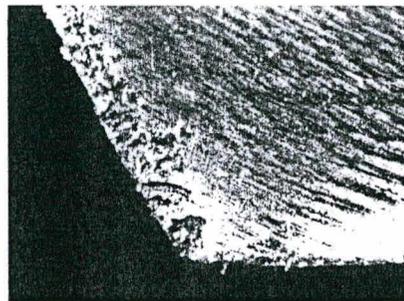
4.3.8 Considerações sobre os Resultados

Mais uma vez a usinagem utilizando emulsão foi a que apresentou as maiores marcas de desgaste de flanco, provavelmente devido aos choques térmicos ocorridos

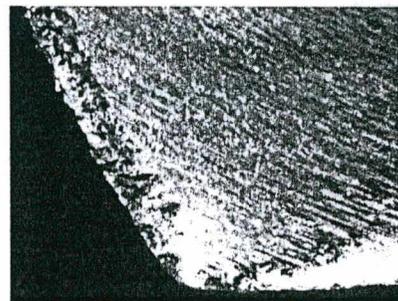
durante o processo, como já comentado anteriormente. A usinagem com MQFC mostrou-se viável, principalmente com o óleo mineral. Este meio lubri-refrigerante apresentou um bom desempenho em termos das curvas de evolução de $VB_{máx}$, F_x , M_f , R_a e R_f . A usinagem a seco, por sua vez, deve ser investigada com mais profundidade, pois as duas brocas ensaiadas nesta condição apresentaram comportamento distintos, dificultando conclusões sobre o desempenho destas ferramentas.

4.4 Ferramentas de Aço-rápido com Revestimento Nitreto de Titânio e Bissulfeto de Molibdênio – 65TiN+MoS₂ – (lote E)

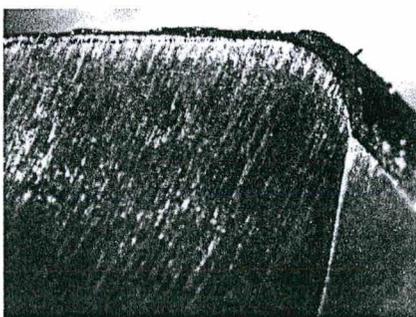
Foram ensaiadas cinco ferramentas, das quais duas usinaram a seco. Porém, ambas (E1 e E2) não atingiram o comprimento de usinagem programado. A última aquisição de dados para a broca E2 foi feita aos 9 m de usinagem. A partir deste ponto a ferramenta começou a vibrar fortemente e decidiu-se então parar o ensaio aos 9,45 m antes que ocorresse a quebra catastrófica. Esta vibração foi gerada provavelmente devido ao desgaste acentuado na face e arredondamento do flanco e da quina da ferramenta (Fig. 66).



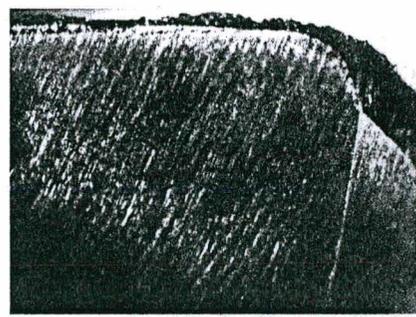
a) Desgaste na face 1



b) Desgaste na face 2



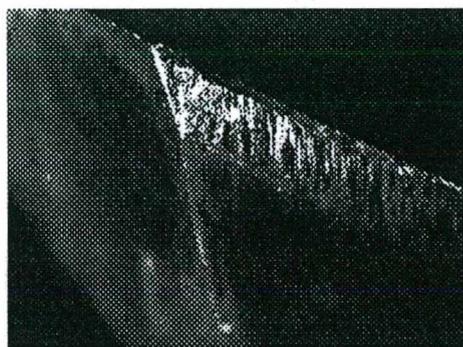
c) Arredondamento do flanco 1



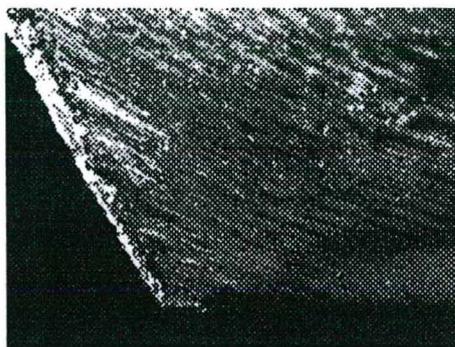
d) Arredondamento do flanco 2

FIGURA 66 – Desgaste apresentado nas faces e flancos da ferramenta de aço-rápido revestida com TiN + MoS₂ (E2) aos 9 m na usinagem a seco.

A ferramenta E1 usinou até 10,5 m, tendo apresentado além de um desgaste mais acentuado na guia lateral 2, um pequeno lascamento na quina 2, o que provavelmente a levou ao colapso (Fig. 67).



a) Desgaste na guia 2



b) Desgaste na face 2

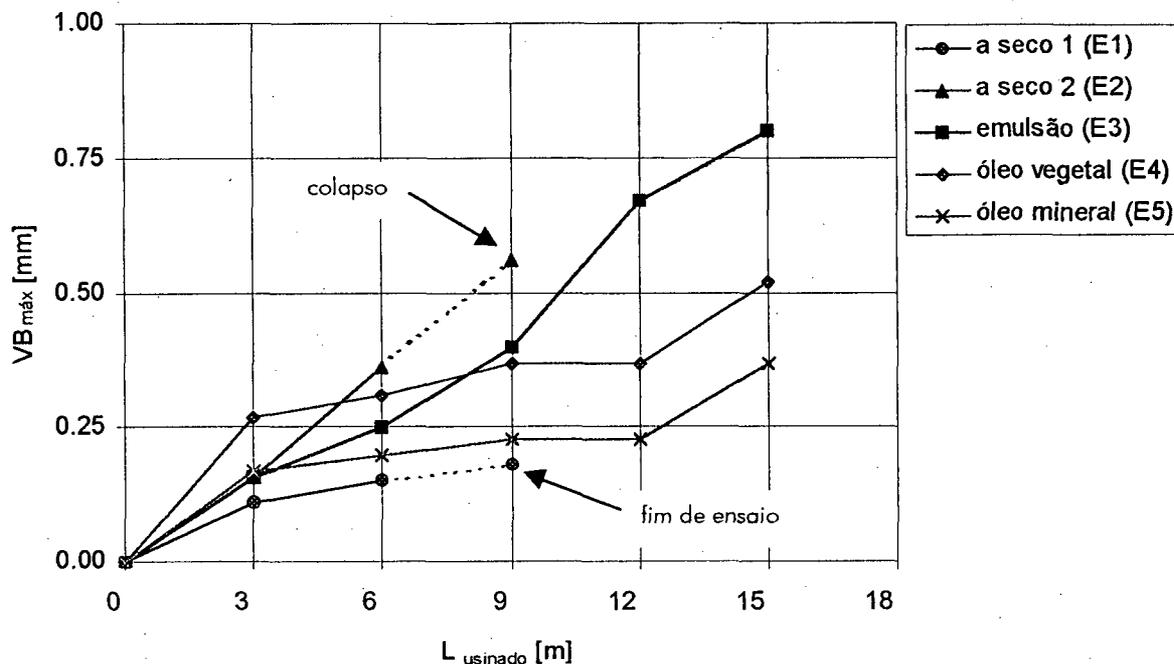
FIGURA 67 – Desgaste apresentado na guia e na face da ferramenta de aço-rápido revestida com TiN + MoS₂ (E1) aos 9 m na usinagem a seco.

Os códigos e as condições de usinagem de cada ferramenta do lote E estão na tabela 11.

TABELA 11 – Ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN+MoS₂ (Lote E).

Código	Condição
E1	A seco
E2	A seco
E3	Emulsão
E4	MQFC – óleo vegetal
E5	MQFC – óleo mineral

4.4.1 Desgaste de Flanco Máximo



Desgaste de flanco $VB_{máx} \times L_{usinado}$
 Ferramenta E; AR/TiN+MoS₂ 651E; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

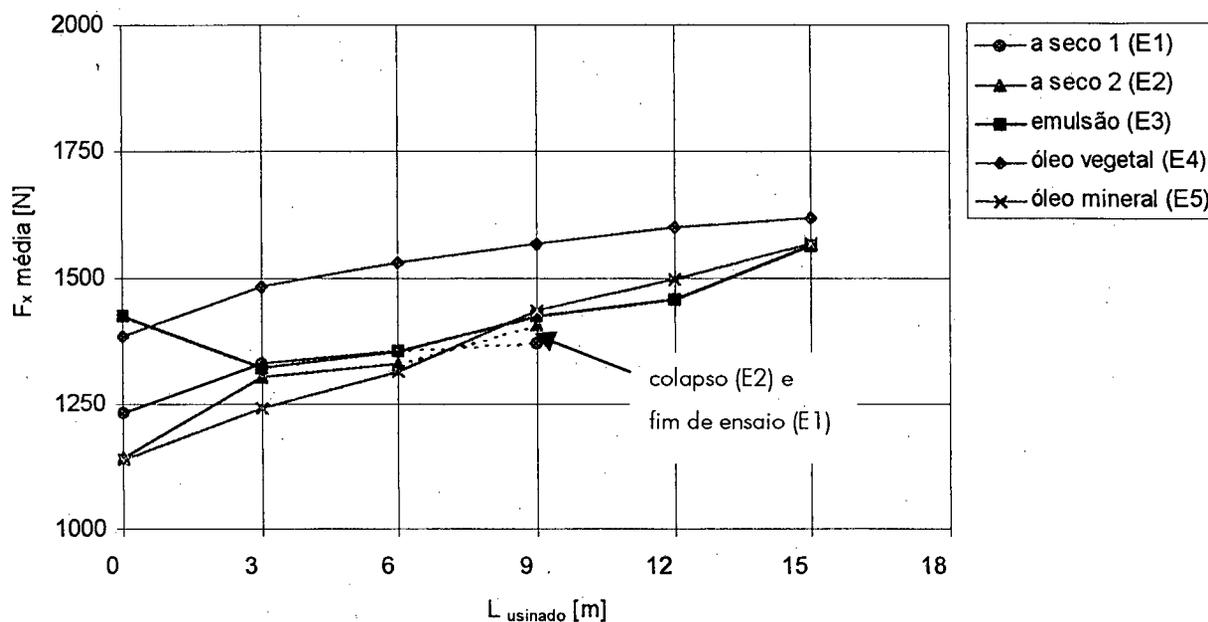
FIGURA 68 – Tendência de evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN+MoS₂ (lote E) em todas as condições ensaiadas.

A figura 68 mostra que as ferramentas que usinaram a seco apresentaram um comportamento diferente na evolução do desgaste de flanco. Isto foi explicado por Subramanian et al. [44], que cita que para brocas, o fenômeno de desgaste é randômico, onde o tamanho, a forma e a região desgastada mudam constantemente. A realização de mais um ensaio nesta condição seria necessária para se poder perceber melhor o comportamento evolutivo de $VB_{máx}$ na usinagem a seco. Porém, a indisponibilidade de uma ferramenta reserva impediu a execução de um novo ensaio.

A usinagem com emulsão apresentou um crescimento da marca de desgaste de flanco muito elevado, principalmente a partir dos 9 m.

Nos casos onde usinou-se com MQFC, o comportamento evolutivo de $VB_{máx}$ foi muito similar para os dois óleos empregados. Porém, a broca que usinou com óleo mineral (E5) obteve os menores valores dentre todas as ferramentas ensaiadas. Aos 9 m o valor de $VB_{máx}$ chegou a ser 3 vezes menor do que o apresentado na usinagem com emulsão.

4.4.2 Força Axial Média



Força axial média X $L_{usinado}$
 Ferramenta E; AR/TiN+MoS₂ 651E; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

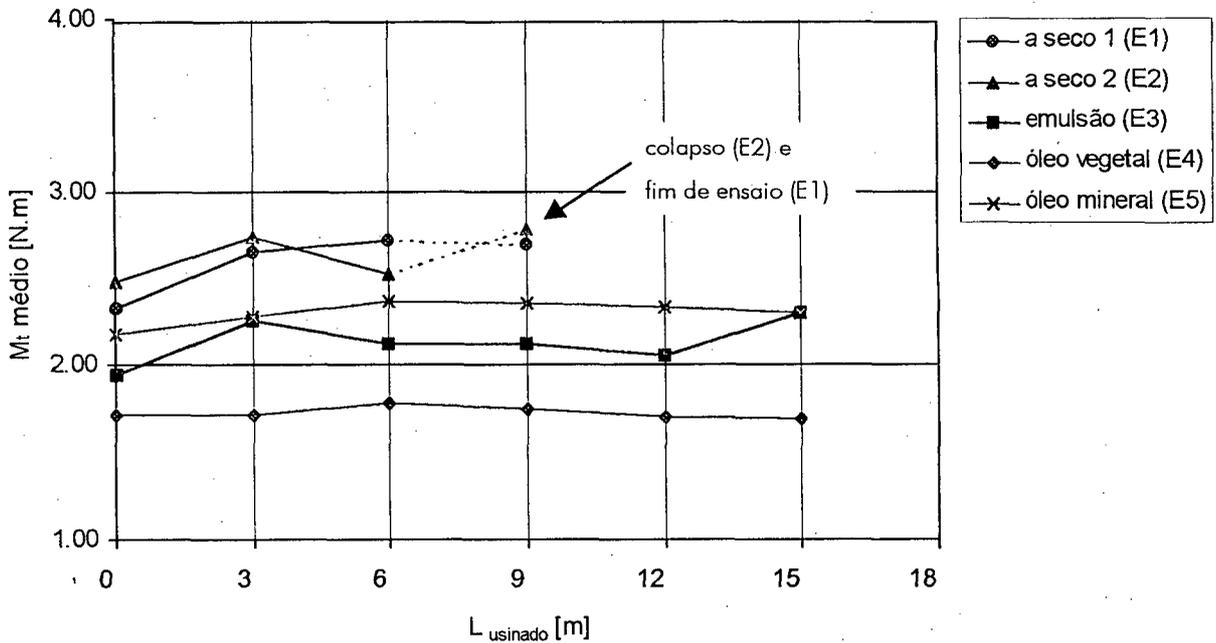
FIGURA 69 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN+MoS₂ (lote E) em todas condições ensaiadas.

A figura 69 mostra que as ferramentas E1 e E2 ensaiadas a seco apresentaram uma similaridade na evolução dos valores da F_x média. Estes valores ficaram bem próximos aos valores apresentados na usinagem com emulsão e óleo mineral até os 9 m. O valor da força de avanço medida durante a usinagem com a broca E3 nova não está de acordo com o valor esperado, e isto pode ter sido causado por problemas operacionais durante a medição ou a presença de alguma inclusão no material. Porém, a partir dos 3 m os dados apresentam-se de forma normal sendo possível analisá-los até os 15 m. Os valores estão

muitos próximos dos adquiridos nos ensaios a seco e com óleo mineral sendo difícil afirmar qual condição apresentou o melhor desempenho.

Está evidente que dentre todas as condições ensaiadas, a usinagem com óleo vegetal foi a que apresentou os maiores valores de F_x média durante todos os ensaios.

4.4.3 Momento Torçor Médio



Momento torçor médio X L_{usinado}
 Ferramenta E; AR/TiN+MoS₂ 651E; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

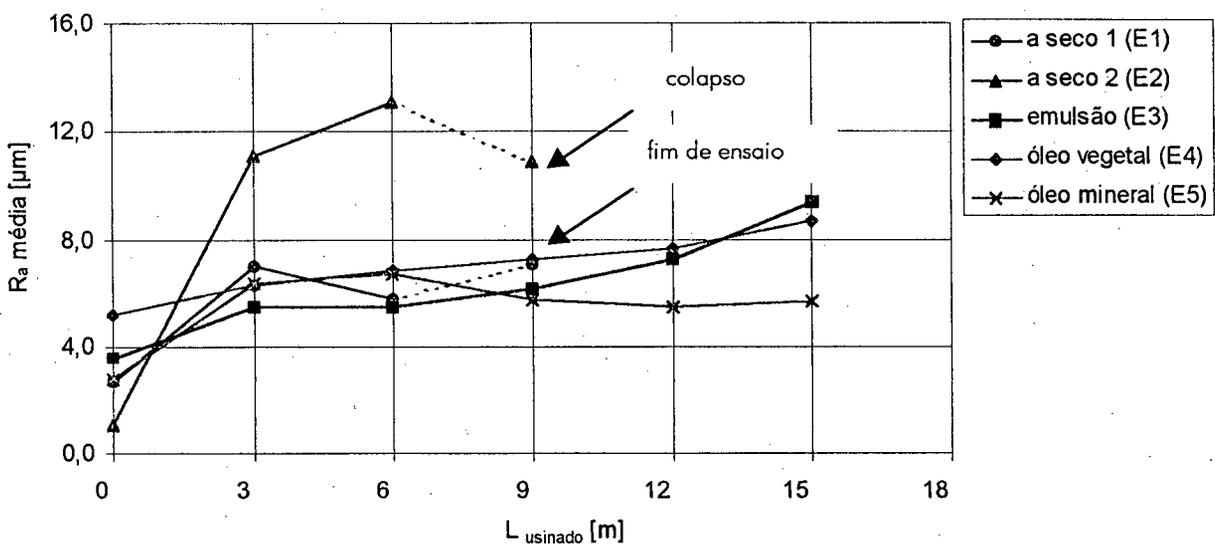
FIGURA 70 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN+MoS₂ (lote E) em todas as condições ensaiadas.

Na usinagem a seco, as ferramentas E1 e E2 apresentaram valores de M_t muito próximos e superiores aos das outras condições de lubrificação e refrigeração. Este comportamento de certa forma é coerente pois nesta condição o atrito entre as guias laterais da ferramenta e a parede do furo é muito elevado. Esta observação também está coerente com a ocorrência do colapso, onde a sobrecarga de momento associada à fragilização da ferramenta devido ao acréscimo de temperatura levaram-na à quebra catastrófica.

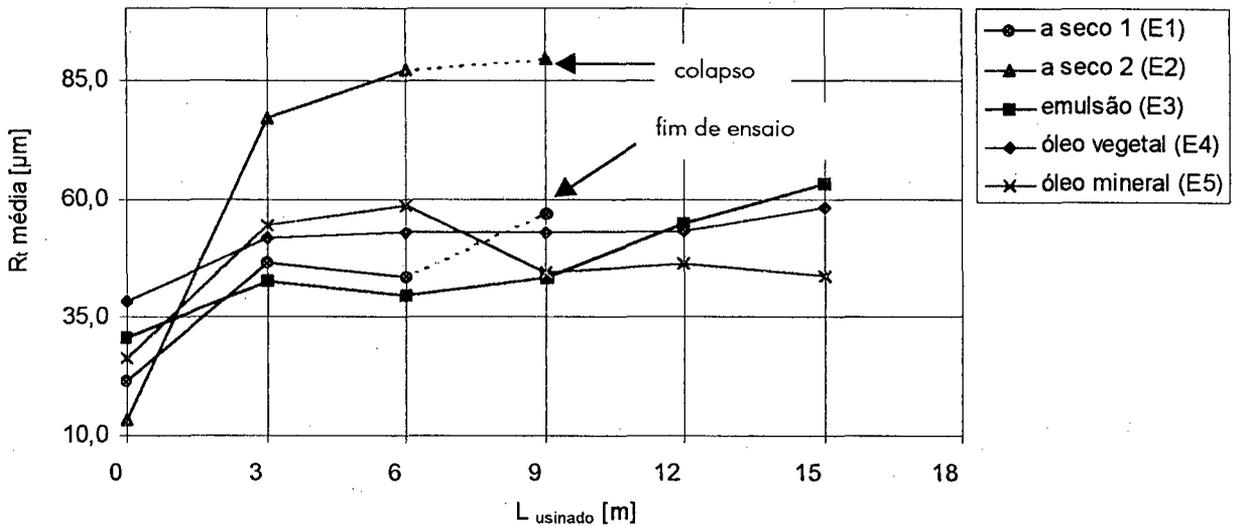
A broca E3 que utilizou emulsão apresentou uma certa instabilidade no comportamento evolutivo da curva do M_r , havendo uma pequena variação nos seis primeiros metros de usinagem como também nos 3 últimos. Os valores situaram-se entre os apresentados na furação com MQFC, sendo superiores aos do óleo vegetal e inferiores aos do óleo mineral.

Dentre todas as condições ensaiadas a que atuou de forma mais eficiente na redução do M_r foi a usinagem com MQFC empregando óleo vegetal, como pode ser percebido claramente na figura 70.

4.4.4 Rugosidades R_a e R_t



Rugosidade R_a média $\times L_{\text{usinado}}$
 Ferramenta E; AR/TiN+MoS₂ 651E; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040



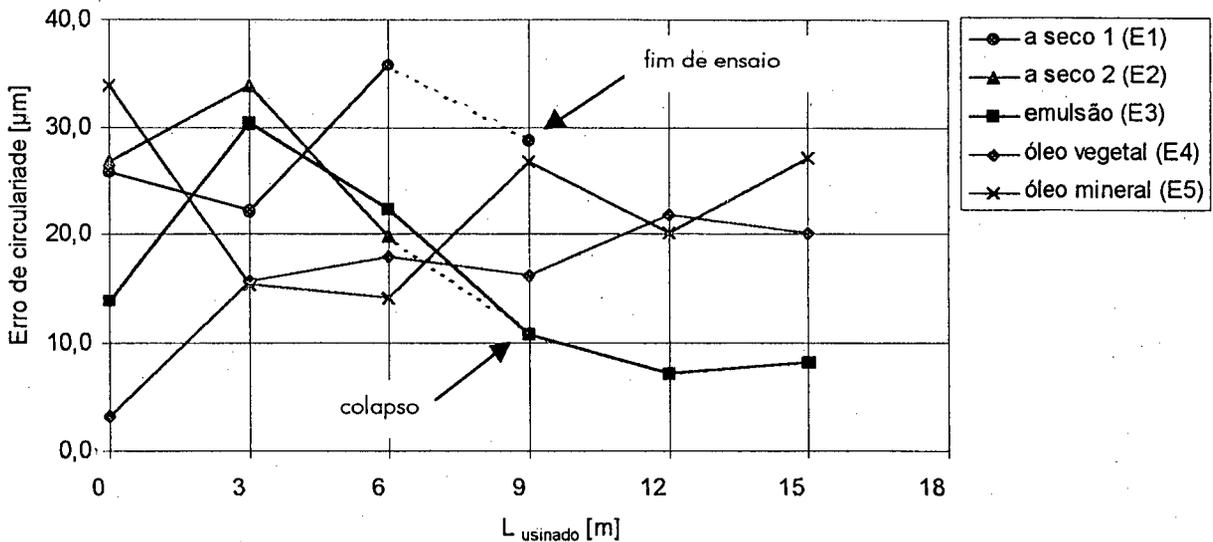
Rugosidade R_t média X L_{usinado}
 Ferramenta E; AR/TiN+MoS₂ 651E; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=32$ m/min; $f=0,185$ mm; $n=1018$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 71 – Tendência de evolução das rugosidades R_a e R_t dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN+MoS₂ (lote E) em todas as condições ensaiadas.

Analisando o comportamento de R_a e R_t na usinagem a seco, nota-se uma grande disparidade nos valores resultantes da furação com as brocas E1 e E2. Este fato provavelmente é resultado das diferentes condições do gume das ferramentas. A realização de mais um ensaio seria necessária para se conhecer melhor o comportamento mais provável da rugosidade na usinagem a seco. Uma observação importante é a relação entre os altos valores de R_a e R_t da ferramenta E2, coincidindo com a evolução acentuada do desgaste de flanco (Fig. 68).

As brocas E3, E4 e E5 apresentaram valores muito parecidos, porém pode-se destacar uma certa estabilidade de R_a e R_t na furação com a broca E4 (óleo vegetal) e a geração dos menores valores de rugosidade nos últimos seis metros de usinagem pela E5 (óleo mineral). Torna-se difícil afirmar qual das ferramentas apresentou os melhores resultados em termos de rugosidade.

4.4.5 Erro de Circularidade



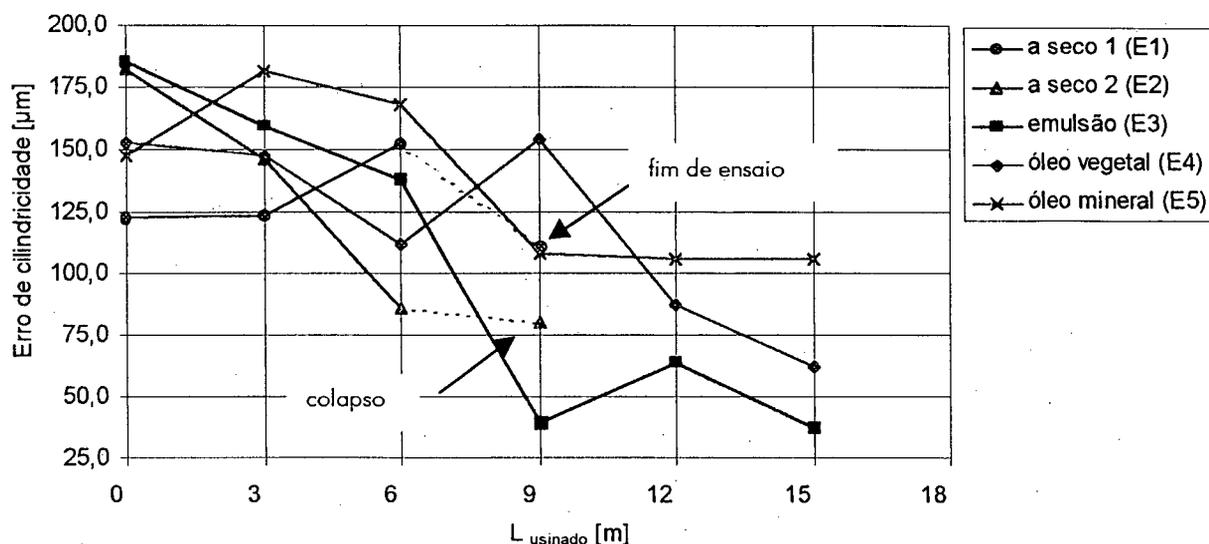
Erro de circularidade X L_{usinado}
 Ferramenta E; AR/TiN+MoS₂ 651E; DIN338
 d=10 mm; v_c=32 m/min; f=0,185 mm; n=1018 rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 72 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN+MoS₂ (lote E) em todas as condições ensaiadas.

Os ensaios a seco mostraram uma grande diferença nos valores e no comportamento evolutivo do erro de circularidade dos furos (Fig. 72). A usinagem com emulsão mostrou uma forte tendência na redução do erro principalmente a partir dos três primeiros metros de usinagem, chegando aos 15 m com um erro de circularidade 3 vezes menor do que o apresentado aos 3 m. Pode-se dizer que foi a condição de lubrificação e refrigeração que melhor atuou no sentido de minimizar este tipo de erro.

As ferramentas que usinaram com MQFC apresentaram um comportamento oposto nos 3 primeiros metros, e a partir deste ponto a tendência de crescimento deste erro pode ser observada claramente. Vale salientar que dentre estas duas condições a usinagem com óleo vegetal mostrou as menores flutuações no valores deste parâmetro.

4.4.6 Erro de Cilindricidade



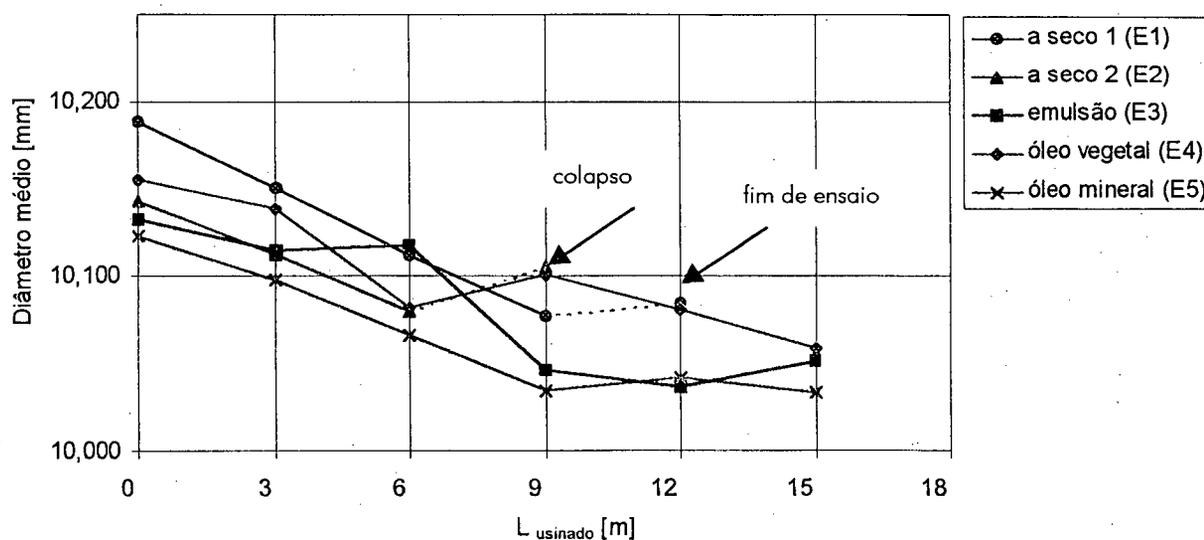
Erro de cilindridade X L_{usinado}
 Ferramenta E; AR/TiN+MoS₂ 651E; DIN338
 d=10 mm; v_c=32 m/min; f=0,185 mm; n=1018 rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 73 – Tendência de evolução do erro de cilindridade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN+MoS₂ (lote E) em todas as condições ensaiadas.

Dentre as condições ensaiadas nota-se que a usinagem empregando emulsão e as que empregaram o óleo vegetal e o mineral em mínima quantidade atuaram no sentido de minimizar o erro de cilindridade durante os ensaios (Fig. 73). Dentre estas, a usinagem com óleo mineral foi a que apresentou os maiores erros nos três metros finais.

A usinagem a seco mais uma vez apresentou comportamento e valores que dificultam uma conclusão sobre a influência desta condição de trabalho no erro de cilindridade.

4.4.7 Diâmetro Médio do Furo



Diâmetro médio X L_{usinado}
 Ferramenta E; AR/TiN+MoS₂ 651E; DIN338
 d=10 mm; v_c=32 m/min; f=0,185 mm; n=1018 rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 74 – Tendência de evolução do diâmetro médio dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN+MoS₂ (lote E) em todas as condições ensaiadas.

A figura 74 mostra que de um modo geral em todas as condições ensaiadas a tendência de redução do diâmetro médio do furo durante a usinagem é evidente. Destaca-se, porém, a atuação do óleo mineral, do vegetal e da emulsão no sentido de minimizar os desvios do diâmetro médio dos furos. A utilização destes meios de lubrificação e refrigeração possibilitou que os furos produzidos se mantiveram dentro da classe IT11. No caso da furação a seco até o momento do colapso e final de ensaio, a broca E1 produziu furos dentro da classe IT12 e a E2, dentro da classe IT10.

4.4.8 Considerações sobre os Resultados

A usinagem a seco no ensaio deste lote de ferramentas mostrou uma similaridade na evolução do momento torçor e da força axial. Já os resultados referentes à qualidade do processo foram distintos, principalmente nos casos dos erros de circularidade e cilindridade. Os comportamentos das rugosidades e do diâmetro médio do furo foram

similares. A usinagem a seco mais uma vez mostrou-se muito severa e merecendo ser melhor investigada a fim de otimizar os parâmetros envolvidos. Os resultados apresentados nos casos em que se usinou com emulsão e com MQFC empregando o óleo vegetal e principalmente com mineral mostraram de uma forma geral resultados melhores e próximos. Deste modo, a usinagem com MQFC tende a ser uma alternativa para a usinagem convencional onde na maioria dos casos utiliza-se emulsão.

4.5 Ferramentas de Aço-rápido com Revestimento Nitreto de Titânio e Alumínio – A1246TFL – (lote C);

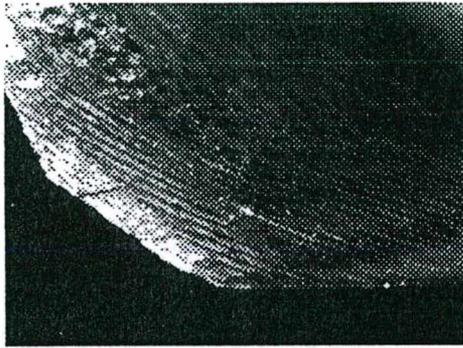
É importante chamar a atenção para o fato de que os resultados mostrados nesta seção devem ser analisados isoladamente. Isto porque esta ferramenta é indicada para a usinagem de ferros fundidos, sendo assim geometricamente diferente das outras ferramentas de aço-rápido ensaiadas. Mesmo assim, decidiu-se por ensaiá-la no aço para possibilitar a avaliação da influência do revestimento de TiAlN em diferentes condições de refrigeração e lubrificação. Como a furação com esta ferramenta utilizando emulsão apresentou bons resultados, decidiu-se por apresentá-los e discutí-los nesta seção com intuito de disponibilizar informações que possam contribuir para futuros trabalhos. Foram utilizadas no total cinco brocas, das quais duas usinaram a seco com o mesmo propósito dos casos anteriores. É importante registrar que as ferramentas do lote C apresentaram um baixo desempenho na usinagem a seco e com MQFC. Os códigos e as condições de lubrificação e refrigeração estão na tabela 12.

TABELA 12 – Ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (Lote C).

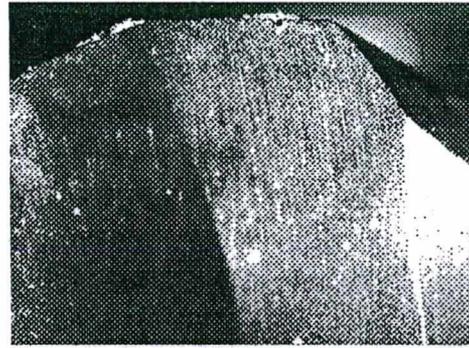
Código	Condição
C1	A seco
C2	A seco
C3	Emulsão
C4	MQFC – óleo vegetal
C5	MQFC – óleo mineral

Dentre todas as ferramentas do lote C, apenas a ferramenta que utilizou a emulsão como meio lubri-refrigerante atingiu o comprimento total de usinagem pré-estabelecido, ou

seja, 15 m. O estado da face e flanco mais desgastados da ferramenta C3 (emulsão) ao final do ensaio está mostrado na figura 74, onde percebe-se que a broca está de certa forma em boas condições.



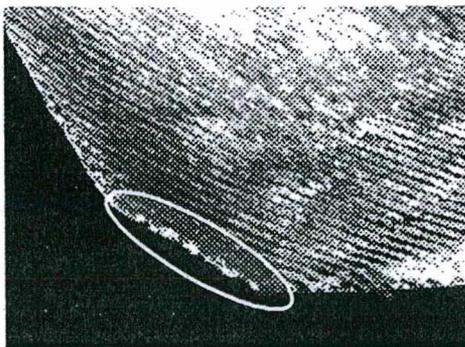
a) Face 1



b) Flanco 1

FIGURA 75 – Desgastes da ferramenta C3 que usinou com emulsão a 15 m de usinagem.

As ferramentas que usinaram a seco não atingiram nem 3 m de usinagem, sendo que C1 e C2 entraram em colapso a 1,20 e 1,99 m respectivamente. Não foram obtidas imagens da ferramenta C1 para se poder analisar as possíveis causas da falha prematura, pois a aquisição estava programada para ser realizada a 1,5 m. Já para a broca C2, foram adquiridas as imagens a 1,5 m, nas quais percebe-se o início de pequenos lascamentos e desgastes na face 1 e no flanco 1 que provavelmente a levaram ao colapso (Fig. 76).



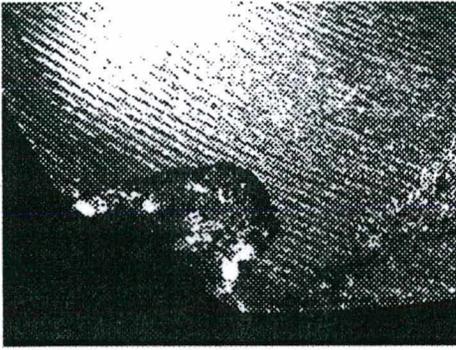
a) Face 1



b) Flanco 1

FIGURA 76 – Desgastes da ferramenta C2 que usinou a seco a 1,5 m de usinagem.

As ferramentas C4 e C5, que usinaram com MQFC, empregando óleo vegetal e mineral respectivamente, não chegaram nem aos cinco dos quinze metros de usinagem programados. A ferramenta C4 apresentou um grande lascamento na face e flanco 1 (Fig. 77) já aos 3 m de usinagem, quebrando logo em seguida aos 3,3 m.



a) Face 1



b) Flanco 1

FIGURA 77 – Desgastes da ferramenta C4 que usinou com MQFC aos 3 m de usinagem.

A ferramenta C5 (óleo mineral) não apresentou anormalidade aparente nas imagens registradas aos 3 m. Porém, logo em seguida (aos 4,41 m), começou a vibrar e a ponta da ferramenta fundiu completamente, como pode ser visto na figura 78.

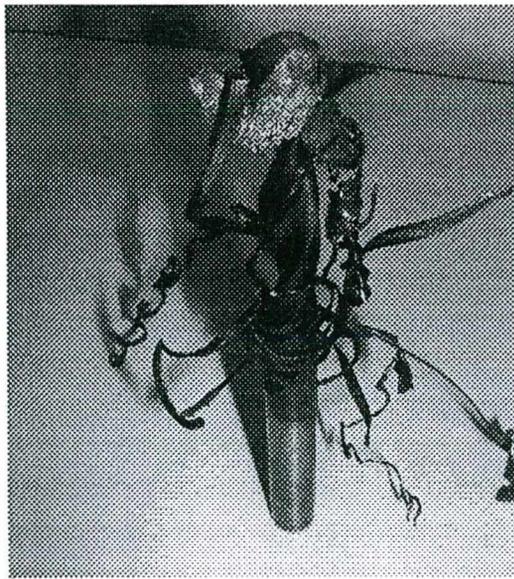
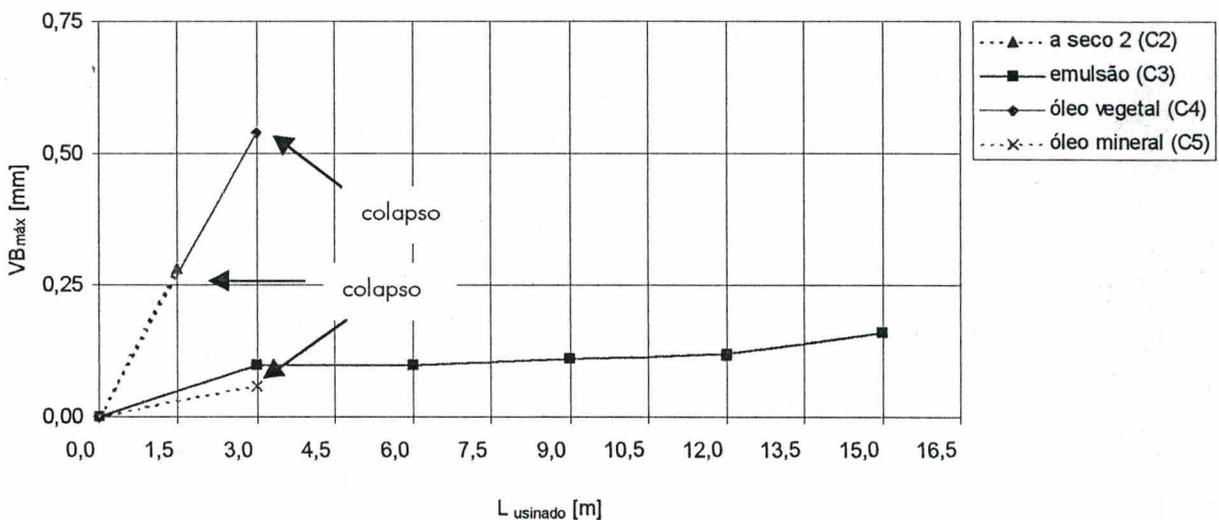


FIGURA 78 – Estado da broca C5 (óleo mineral) a 4,41 m de usinagem.

O fraco desempenho desta ferramenta em três das quatro condições ensaiadas pode ser explicado. Primeiramente, o fabricante a recomenda para usinar ferro fundido e ligas de AlSi, mas mesmo assim decidiu-se ensaiá-la na usinagem do aço. Esta broca possui uma forma especial de afiação da ponta, apresentando um ângulo de ponta secundário. Quando o ângulo de ponta é menor que 118° os gumes principais, segundo Stemmer, tornam-se convexos tendendo a produzir vibrações na usinagem. [47].

4.5.1 Desgaste de Flanco Máximo



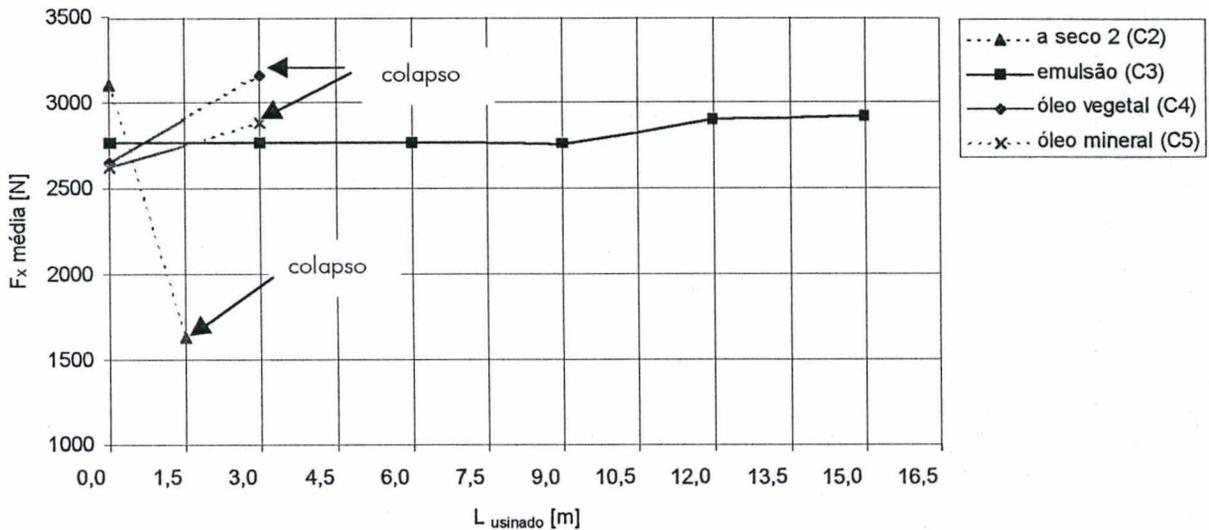
Desgaste de flanco $VB_{máx} \times L_{usinado}$
 Ferramenta C; AR+Co/TiAlN; A1246TFL; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=45$ m/min; $f=0,35$ mm; $n=1432$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 79 – Tendência de evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas as condições ensaiadas.

A figura 79 mostra que a usinagem com emulsão apresentou, de um modo geral, valores baixos e comportamento bem estável da evolução da marca de desgaste máximo de flanco. Durante a usinagem dos 3 primeiros e dos 3 últimos metros nota-se um crescimento de $VB_{máx}$, mas não muito acentuado. A elevada resistência à oxidação e o coeficiente de atrito relativamente baixo do TiAlN [4, 53, 58, 62], associados à ação refrigerante da emulsão mostrou-se ser muito eficiente na minimização da evolução do desgaste de flanco. Segundo Klocke et al. [53], o TiAlN devido à sua dureza reduz os danos causados pelo

mecanismo abrasivo de desgaste e confere à ferramenta uma maior resistência à fadiga térmica e mecânica do que o TiN. Por este motivo, os valores de $VB_{máx}$ na usinagem com emulsão ficaram bem abaixo dos apresentados pelas ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN ensaiadas sob a mesma condição de refrigeração e lubrificação. Na usinagem a seco e com MQFC empregando óleo vegetal, houve um crescimento muito rápido do desgaste de flanco nos 3 primeiros metros de furação e logo em seguida as ferramentas sofreram colapso. Os valores apresentados pela broca C5 nos 3 primeiros metros de usinagem foram muito similares aos apresentados na furação com emulsão.

4.5.2 Força Axial Média



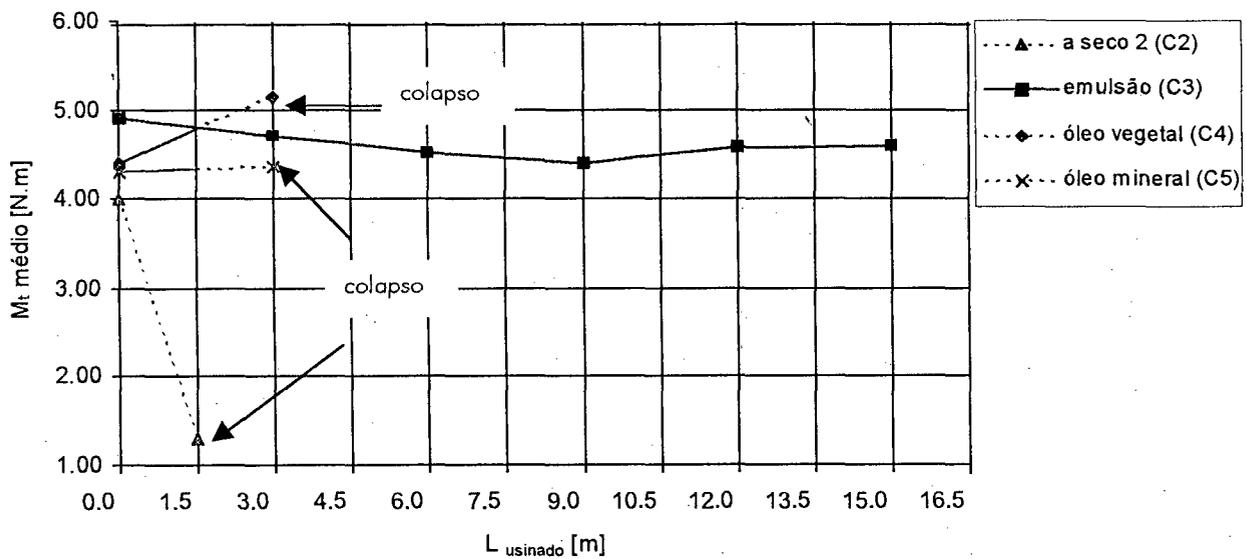
Força axial média X $L_{usinado}$
 Ferramenta C; AR+Co/TiAlN; A1246TFL; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=45$ m/min; $f=0,35$ mm; $n=1432$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 80 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas condições ensaiadas.

A furação com a broca C3 (Fig. 80), gerou valores de F_x relativamente altos se comparados aos das outras ferramentas de aço-rápido revestidas ensaiadas com emulsão e citadas anteriormente. Os valores de F_x das outras ferramentas situam-se entre 1000 e 1700 N, enquanto que para a C3 estão entre 2750 e 3000 N. A evolução de F_x da broca C3 manteve uma certa estabilidade, acompanhando de certa forma a evolução do desgaste

(Fig. 79). A ferramenta que usinou a seco (C2) apresentou um comportamento bem diferente do apresentado pelas brocas que usinaram com MQFC. Há uma queda muito acentuada da força axial nos primeiros metros de usinagem. Não é possível afirmar o que provocou este comportamento, pode ter sido por exemplo, causado por um erro operacional ou algum fenômeno na região de corte do material. Para as duas ferramentas (C4 e C5) que usinaram com MQFC houve um crescimento de F_x momentos antes do colapso, sendo este comportamento de certa forma esperado.

4.5.3 Momento Torçor Médio



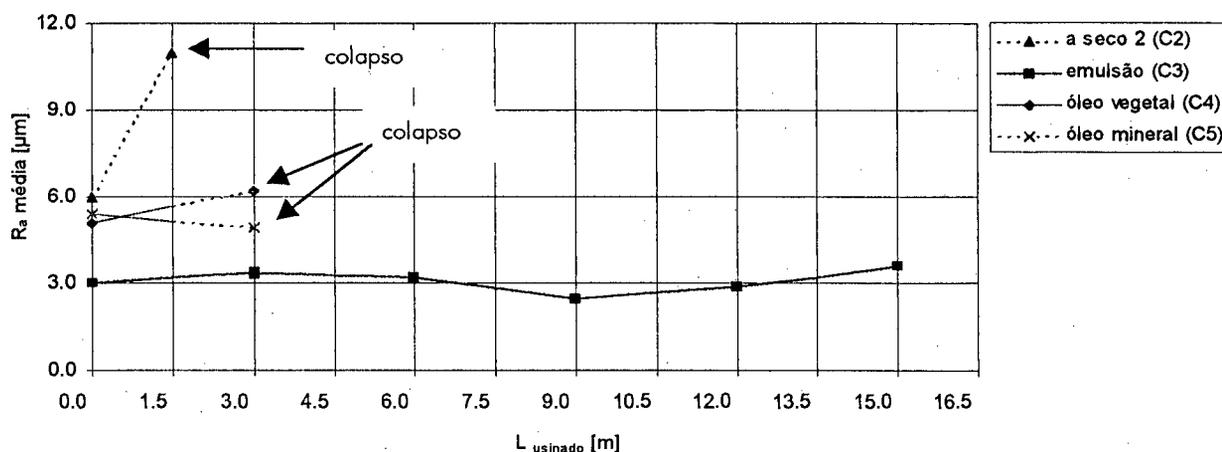
Momento torçor médio X L_{usinado}
 Ferramenta C; AR+Co/TiAlN; A1246TFL; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=45$ m/min; $f=0,35$ mm; $n=1432$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 81 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas as condições ensaiadas.

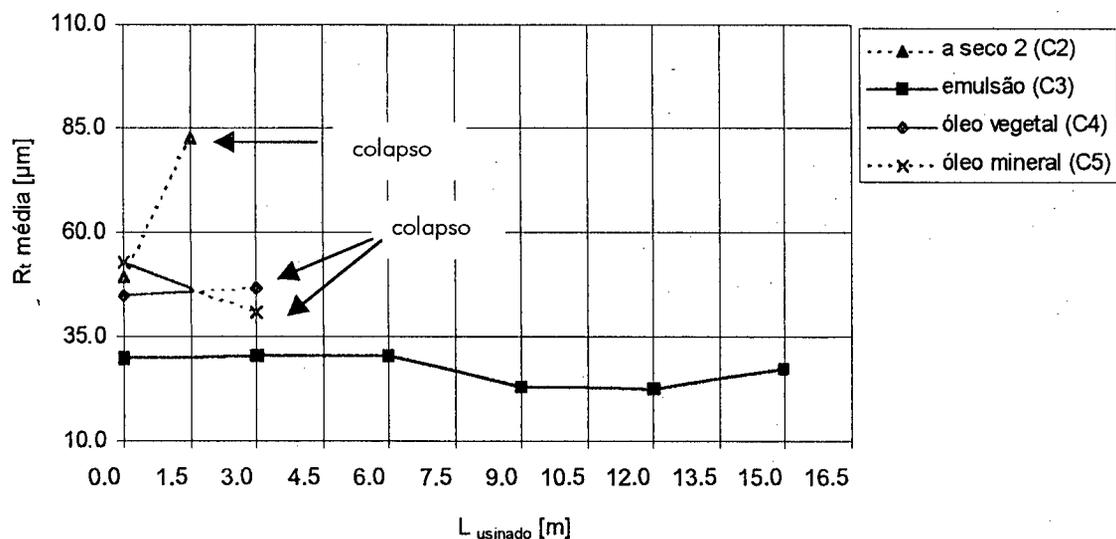
Como aconteceu para F_x , a tendência evolutiva da curva do M_t durante a usinagem com emulsão (C3) também apresentou uma certa estabilidade (Fig. 81). Porém, neste caso, observa-se uma leve redução dos valores do momento até os 9 m de usinagem na usinagem com emulsão. As outras ferramentas (C2, C4 e C5) apresentaram um comportamento semelhante ao apresentado na evolução do F_x , sendo que as mesmas

considerações apresentadas no caso podem ser válidas para explicar o comportamento evolutivo de M_r .

4.5.4 Rugosidades R_a e R_t



Rugosidade R_a média X $L_{usinado}$
 Ferramenta C; AR+Co/TiAlN; A1246TFL; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=45$ m/min; $f=0,35$ mm; $n=1432$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

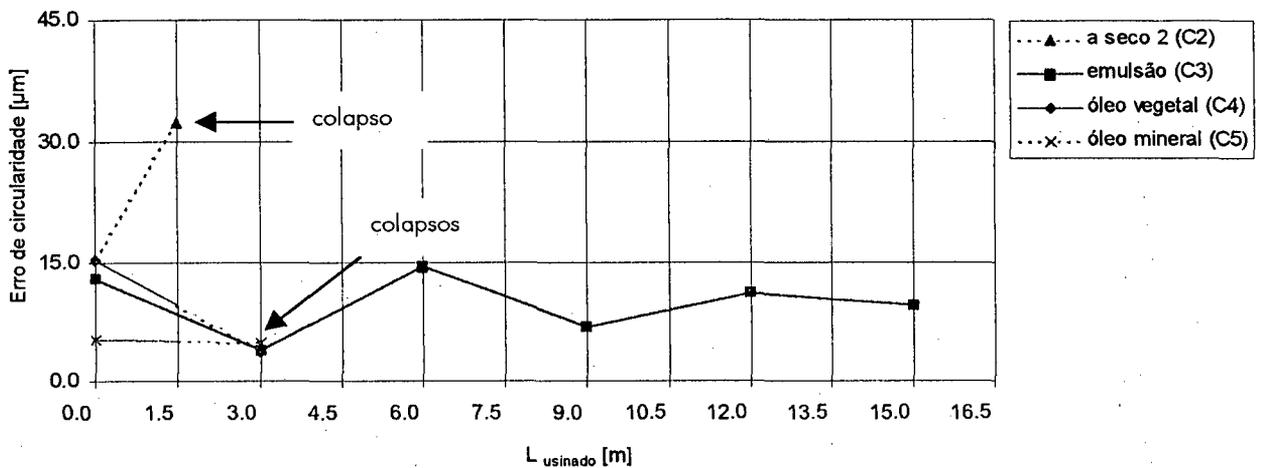


Rugosidade R_t média X $L_{usinado}$
 Ferramenta C; AR+Co/TiAlN; A1246TFL; DIN338
 $d=10$ mm; $v_c=45$ m/min; $f=0,35$ mm; $n=1432$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 82 – Tendência de evolução das rugosidades R_a e R_t para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas as condições ensaiadas.

Os valores das rugosidades mostrados na figura 82 foram, de certa forma, constantes durante toda a usinagem com emulsão, sendo que ao analisar os valores de R_a , sabe-se que estes mantiveram-se dentro de uma faixa aceitável para a furação com brocas helicoidais (2,54 – 6,35 μm) [5].

4.5.5 Erro de Circularidade

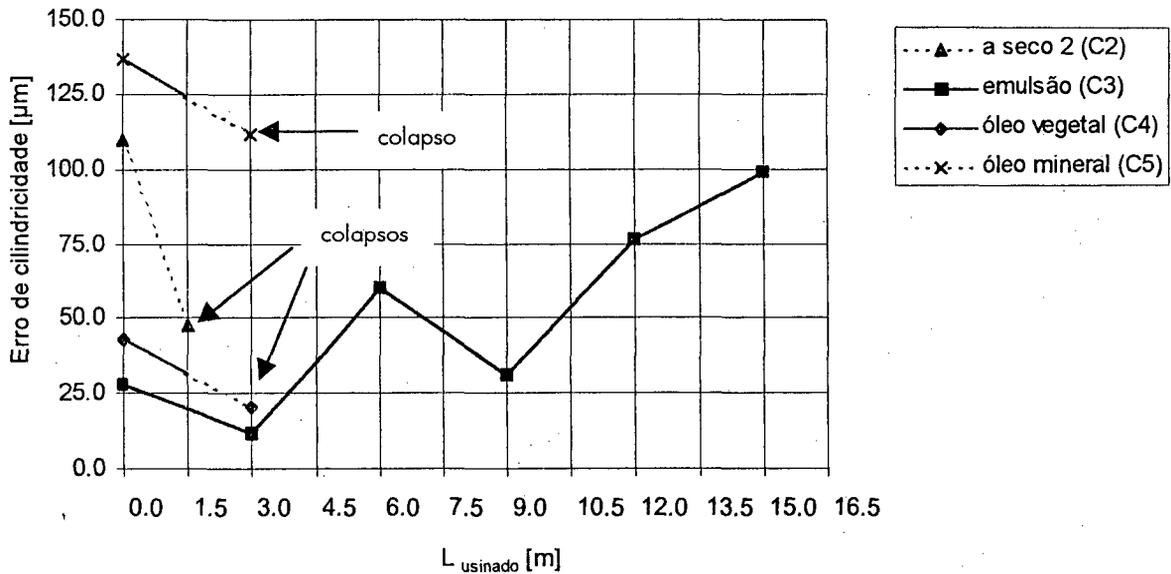


Erro de circularidade X L_{usinado}
 Ferramenta C; AR+Co/TiAlN; A1246TFL; DIN338
 $d=10 \text{ mm}$; $v_c=45 \text{ m/min}$; $f=0,35 \text{ mm}$; $n=1432 \text{ rpm}$
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 83 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas as condições ensaiadas.

A furação com a broca C3 mostrou um comportamento relativamente estável na evolução do erro de circularidade como mostra a figura 83. A furação a seco, por sua vez, novamente teve um comportamento diferente das outras ferramentas, as quais apresentaram valores baixos no erro de circularidade durante os 3 primeiros metros de usinagem.

4.5.6 Erro de Cilindricidade

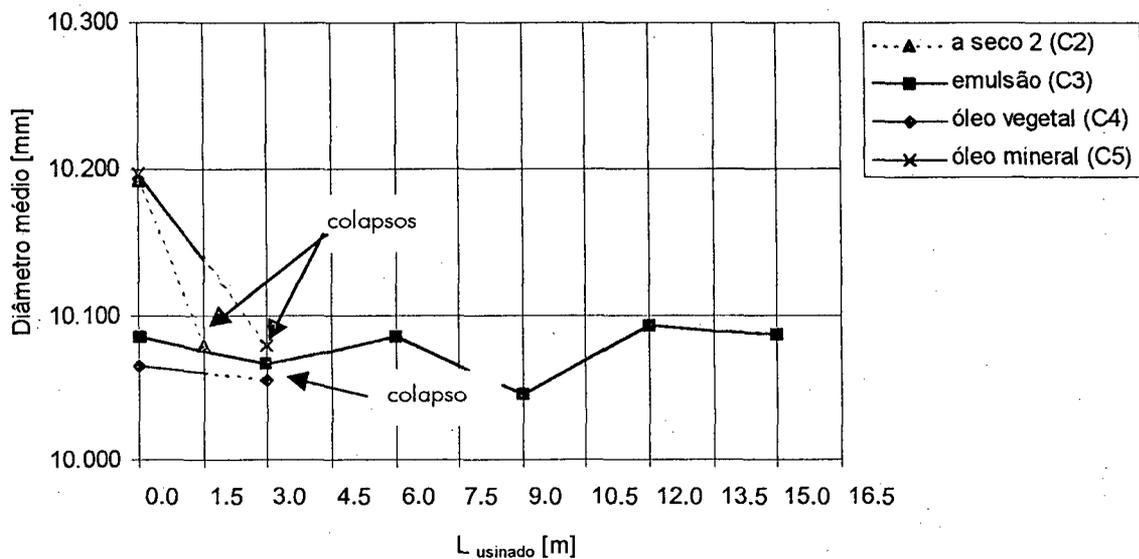


Erro de cilindridade X L_{usinado}
 Ferramenta C; AR+Co/TiAlN; A1246TFL; DIN338
 d=10 mm; v_c=45 m/min; f=0,35 mm; n=1432 rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 84 – Tendência de evolução do erro de cilindridade dos furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas as condições ensaiadas.

O erro de cilindridade (Fig. 84) gerado na usinagem com emulsão mostrou uma tendência de crescimento ao longo da furação principalmente a partir dos 9 metros. No caso das outras brocas ocorreu uma redução do erro de cilindridade nos instantes que antecederam o colapso das ferramentas. É importante notar que o erro de cilindridade no início da furação com as brocas (C2 e C5) é muito elevado. Acredita-se que problemas de rigidez na montagem da ferramenta no dispositivo de fixação e na máquina podem ter levado à obtenção destes valores.

4.5.7 Diâmetro Médio do Furo



Diâmetro médio X L_{usinado}
 Ferramenta C; AR+Co/TiAlN; A1246TFL; DIN338
 d=10 mm; v_c=45 m/min; f=0,35 mm; n=1432 rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 85 – Tendência de evolução do diâmetro médio furos para as ferramentas de aço-rápido revestidas com TiAlN (lote C) em todas as condições ensaiadas.

A capacidade de refrigeração da emulsão contribuiu para que a evolução do diâmetro do furo no decorrer do ensaio tenha se comportado de forma relativamente estável, como mostra a figura 85. Os valores do diâmetro médio na usinagem com emulsão mantiveram-se dentro da classe IT10, sendo este um bom resultado. Esta influência positiva da emulsão na qualidade do furo foi constatada também por Tönshoff et al. [4]. A partir de 1,5 m os furos apresentaram diâmetros médios com valores muito próximos mesmo usinando em diferentes condições de lubrificação e refrigeração. Como no caso anterior (erro de cilindridade), os valores iniciais do diâmetro médio dos furos para as brocas C2 e C5 estão acima dos valores das outras condições. A hipótese da ocorrência de problemas na rigidez de fixação também é considerada neste caso.

4.5.8 Considerações sobre os Resultados

Apesar desta ferramenta não ser indicada para a usinagem do aço, apresentou inesperadamente um bom desempenho em termos de vida e qualidade da furação quando se utilizou a emulsão como meio de refrigeração e lubrificação. Nas outras condições de refrigeração e lubrificação ensaiadas os esforços de corte, como também o calor gerado, foram muito elevados devido principalmente às características geométricas da broca. Na maioria dos casos a ponta das brocas deformou-se plasticamente, chegando em casos extremos a fundir-se totalmente.

4.6 Ferramentas de Metal-duro com Revestimento de Nitreto de Titânio – A3265TiN – (lote F)

Foram ensaiadas quatro brocas de metal-duro revestidas com nitreto de em diferentes condições de refrigeração e lubrificação. Todas as ferramentas testadas alcançaram o comprimento final de usinagem estabelecido (30 m) durante o planejamento experimental. Os códigos e as condições de usinagem destas ferramentas são mostrados na tabela 13.

TABELA 13 – Ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (Lote F).

Código	Condição
F1	A seco
F2	Emulsão
F3	MQFC – óleo vegetal
F4	MQFC – óleo mineral

O estado da ferramenta que apresentou as maiores marcas de desgaste pode ser observado na figura 86. Nesta figura, a face e flanco mais desgastados da ferramenta F2 aos 30 metros podem ser vistos. Esta broca ainda está relativamente em boas condições.

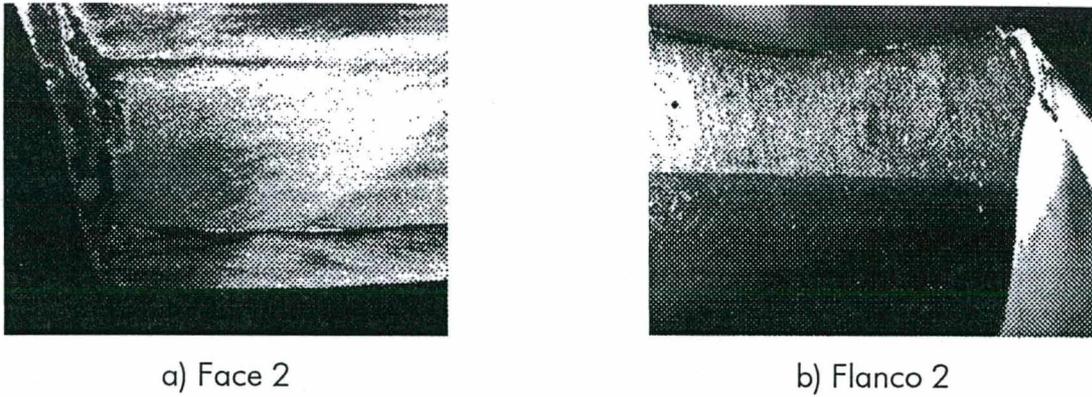
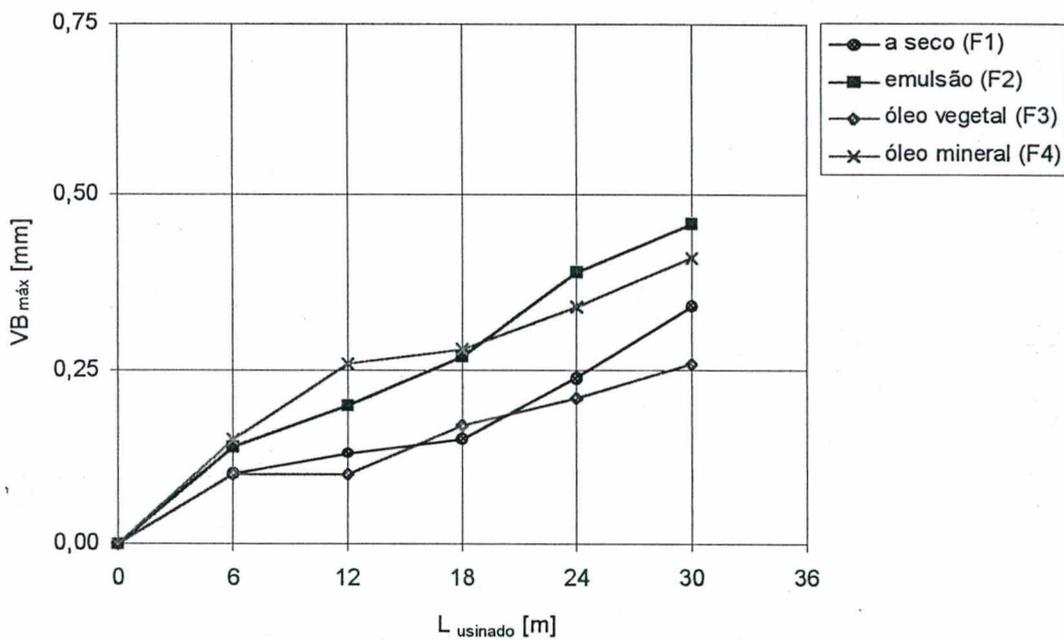


FIGURA 86 – Estado final aos 30 m da ferramenta F2 que usinou empregando emulsão.

4.6.1 Desgaste de Flanco Máximo



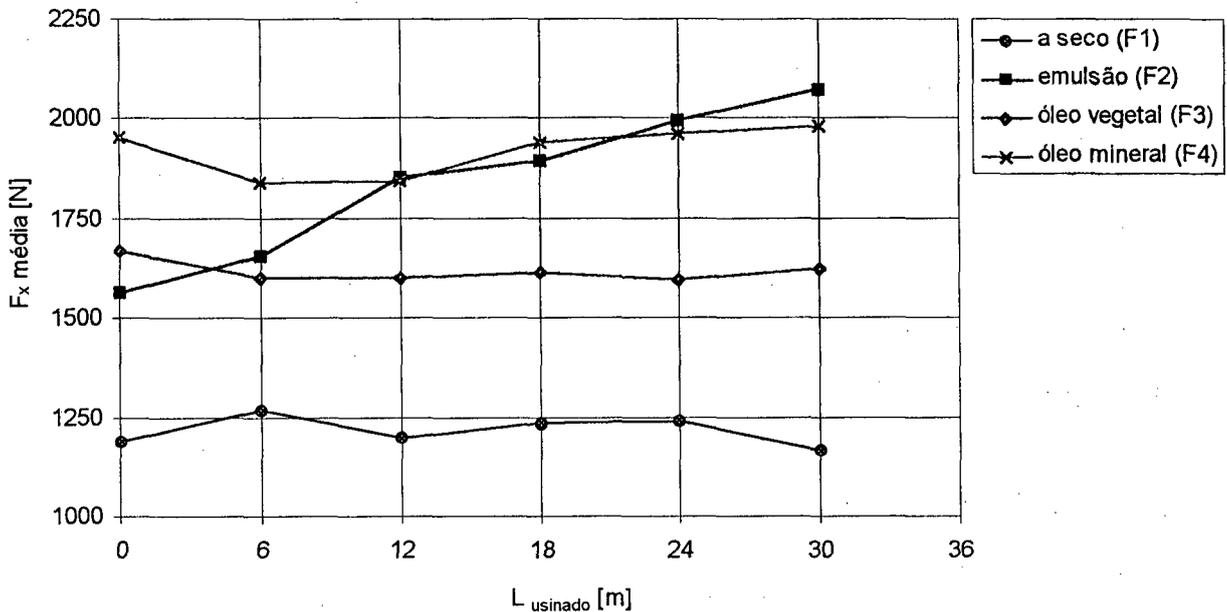
Desgaste de flanco $VB_{m\acute{a}x} \times L_{usinado}$
 Ferramenta F; Metal-duro/TiN A3265TiN; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 87 – Tendência de evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas as condições ensaiadas.

A figura 87 mostra que o comportamento evolutivo do $VB_{m\acute{a}x}$ pode ser analisado aos pares, ou seja, a usinagem com óleo mineral e com emulsão apresentou comportamento semelhante, e o mesmo ocorreu com a usinagem a seco e com óleo vegetal. Aparentemente, o óleo mineral neste caso atuou mais na refrigeração do que na lubrificação do processo, hipótese esta que poderá ser reforçada na apresentação dos esforços de corte. Nos casos onde o poder refrigerante do produto é maior, existe a tendência de deterioração do revestimento através do choque térmico, permitindo que haja um maior contato entre o material da peça e o substrato da ferramenta, o que acelerar o processo de desgaste [42].

O óleo vegetal neste caso atuou mais fortemente como lubrificante, resultando em um menor desgaste de flanco. Segundo Koepfer [80], além da redução do atrito, os óleos vegetais podem atuar como isolantes térmicos do revestimento e do substrato da ferramenta, proporcionando taxas menores de desgaste. A usinagem a seco, por sua vez, preservou mais o revestimento e, sendo assim, a evolução do desgaste foi atenuada. Se o desempenho da broca F2 (emulsão), que apresentou o maior $VB_{m\acute{a}x}$ no final do ensaio, for comparado ao da broca F3 (óleo vegetal), que apresentou o menor $VB_{m\acute{a}x}$ no mesmo ponto, nota-se que F2 apresentou um desgaste aproximadamente 50% maior.

4.6.2 Força Axial Média



Força axial média X $L_{usinado}$
 Ferramenta F; Metal-duro/TiN A3265TiN; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

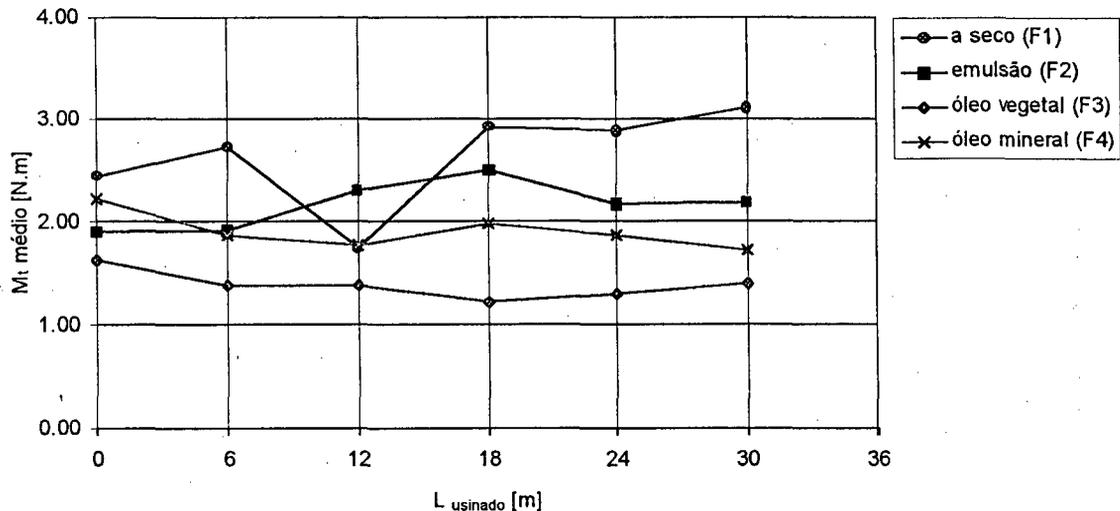
FIGURA 88 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas condições ensaiadas.

Analisando o comportamento da broca F1 (Fig. 88), percebe-se que esta apresentou os menores valores de F_x dentre todas as condições ensaiadas. Isto pode ser explicado devido ao calor gerado nesta condição de usinagem, que é maior do que nos outros casos. Sendo assim, ocorre um amolecimento do material da peça que, por consequência, acaba reduzindo as forças de usinagem [6, 30].

A usinagem com emulsão (F2) e a com óleo mineral (F4) apresentaram valores de F_x relativamente próximos, o que pode indicar a tendência do óleo mineral em atuar mais efetivamente na refrigeração do processo nestas condições de ensaio. A diferença entre estas duas condições está no comportamento evolutivo da curva, sendo que a usinagem com emulsão apresentou um crescimento acentuado nos valores de F_x , enquanto que a usinagem com MQFC empregando óleo mineral apresentou valores mais estáveis.

A ferramenta F3 (óleo vegetal) apresentou valores constantes de F_x e maiores somente que os da broca F1 que usinou a seco. Isto deve-se provavelmente à sua ação lubrificante na interface peça/ferramenta. Conforme Koepfer [80], a capacidade de lubrificação deste produto é melhorada por meio de aditivos presentes na sua composição.

4.6.3 Momento Torçor Médio



Momento torçor médio X L_{usinado}
 Ferramenta F; Metal-duro/TiN A3265TiN; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

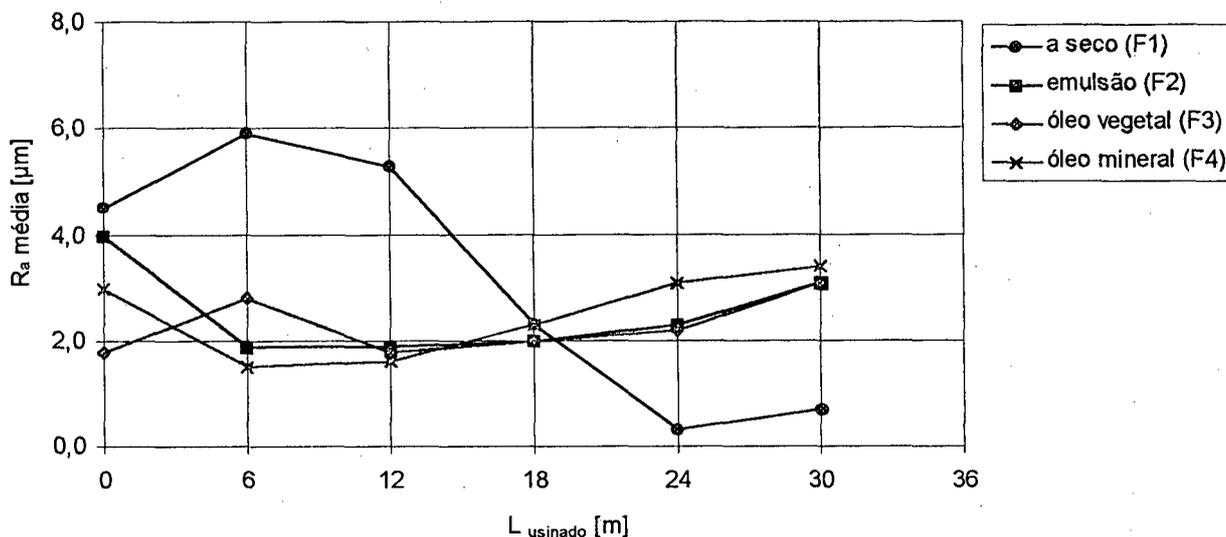
FIGURA 89 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas as condições ensaiadas.

Analisando a figura 89, percebe-se que a condição de usinagem a seco foi a que apresentou os maiores valores de M_t . Este fato pode ser explicado considerando-se que dentre todas as condições ensaiadas é nesta condição que o atrito entre as guias laterais e a parede do furo é maior. É importante ressaltar que o valor apresentado de M_t aos 12 m pode ter ocorrido por problemas operacionais ou por alguma instabilidade no processo.

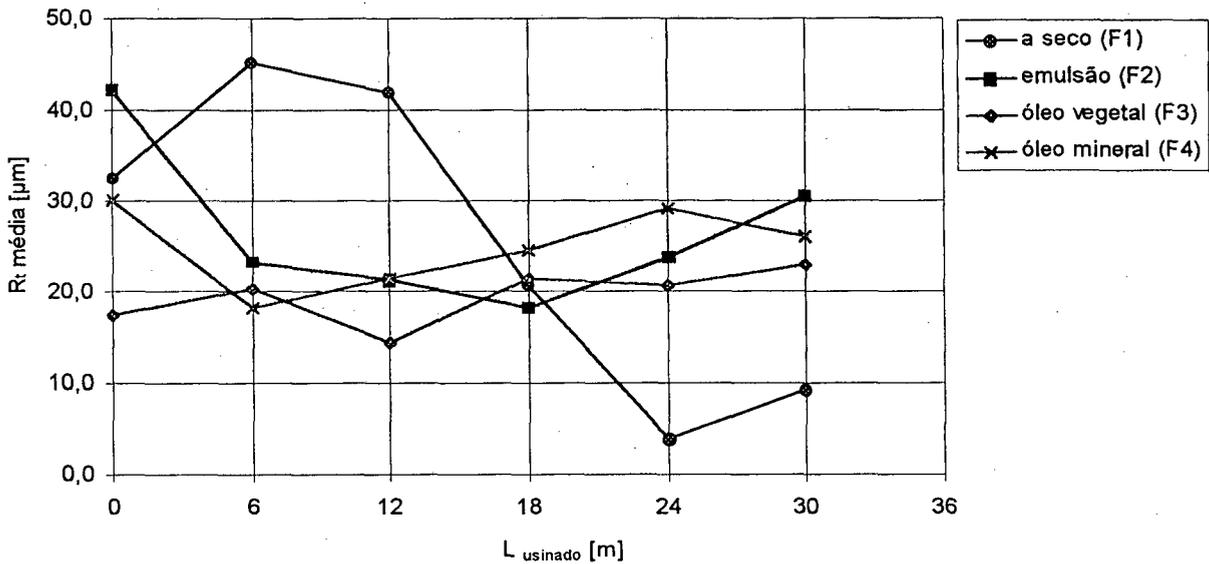
A usinagem com óleo mineral e emulsão mais uma vez apresentou valores muito próximos, tendo a emulsão uma tendência de crescimento um pouco maior que a usinagem com MQFC com óleo mineral.

A atuação do óleo vegetal como lubrificante nestas condições de usinagem fica mais uma vez evidenciada através do comportamento da curva de M_v , onde devido a uma redução do atrito entre as guias laterais e a parede do furo tem-se os menores valores dentre as condições ensaiadas.

4.6.4 Rugosidades R_a e R_t



Rugosidade R_a média X L_{usinado}
 Ferramenta F; Metal-duro/TiN A3265TiN; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040



Rugosidade R_t média X $L_{usinado}$
 Ferramenta F; Metal-duro/TiN A3265TiN; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

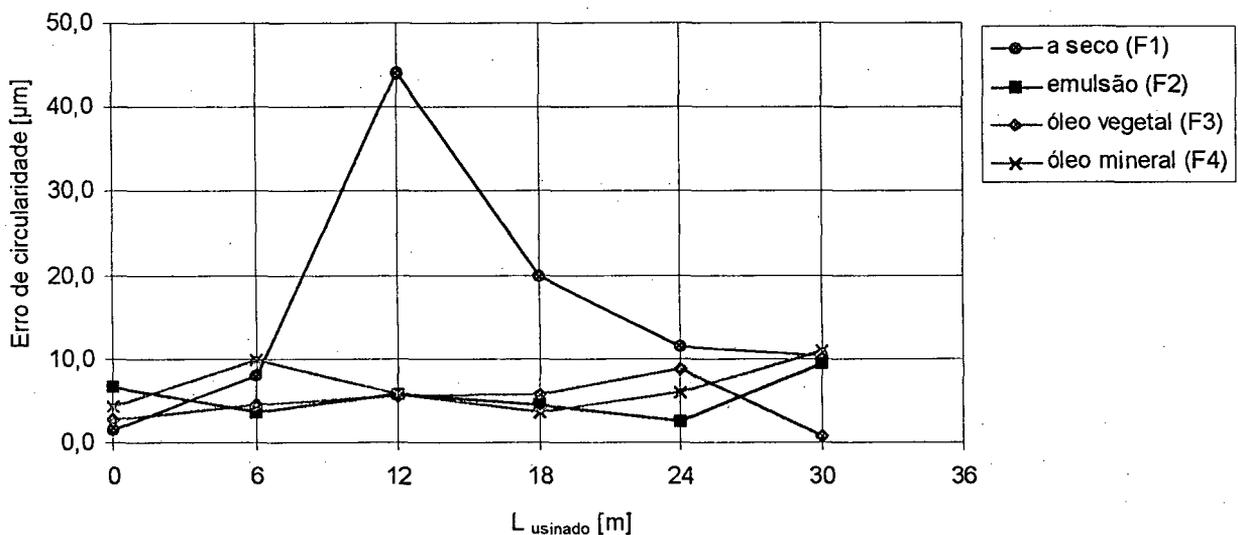
FIGURA 90 – Tendência de evolução das rugosidades R_a e R_t para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas as condições ensaiadas.

O comportamento evolutivo das rugosidades R_a e R_t pode ser analisado na figura 90, onde estes parâmetros estão registrados para todas as condições ensaiadas. Dentre elas, a usinagem a seco foi a que apresentou a maior variação, apresentando valores crescentes até os 6 primeiros metros e caindo acentuadamente até os 24 m. Esta condição de usinagem gera os maiores atritos entre as guias laterais da broca e a parede do furo. Além disso, segundo alguns autores como Klocke e Gerschwiler [29] e Novaski e Dörr [28] na usinagem a seco a dificuldade de remoção dos cavacos para fora do furo é maior, podendo ocorrer a soldagem dos mesmos na ferramenta o que pode afetar a qualidade das peças. O calor excessivo gerado na usinagem a seco, segundo Graham [31], faz com que a qualidade superficial seja deteriorada rapidamente, isto pode explicar o comportamento instável de R_a e R_t nesta condição de ensaio. Se inicialmente tende-se a considerar a queda dos valores de rugosidade na usinagem a seco como uma melhora na qualidade do

processo, principalmente a partir dos 12 m, ao se analisar o comportamento da curva como um todo, conclui-se a qualidade do processo é afetada de forma negativa.

A usinagem com emulsão e com óleo mineral mais uma vez apresentou comportamento evolutivo semelhante, principalmente de R_a . Nestas duas condições há uma grande redução nos valores das rugosidades nos seis primeiros metros de usinagem. De uma forma geral, os valores de R_a e R_t para as ferramentas F2, F3 e F4 foram muito próximos e o comportamento da F1 sofreu grande variação, dificultando uma conclusão sobre qual condição apresentou o melhor desempenho em termos de qualidade superficial. Mas dentre todas as condições a usinagem com MQFC empregando óleo vegetal destaca-se das demais por apresentar valores de R_a e R_t mais estáveis.

4.6.5 Erro de Circularidade



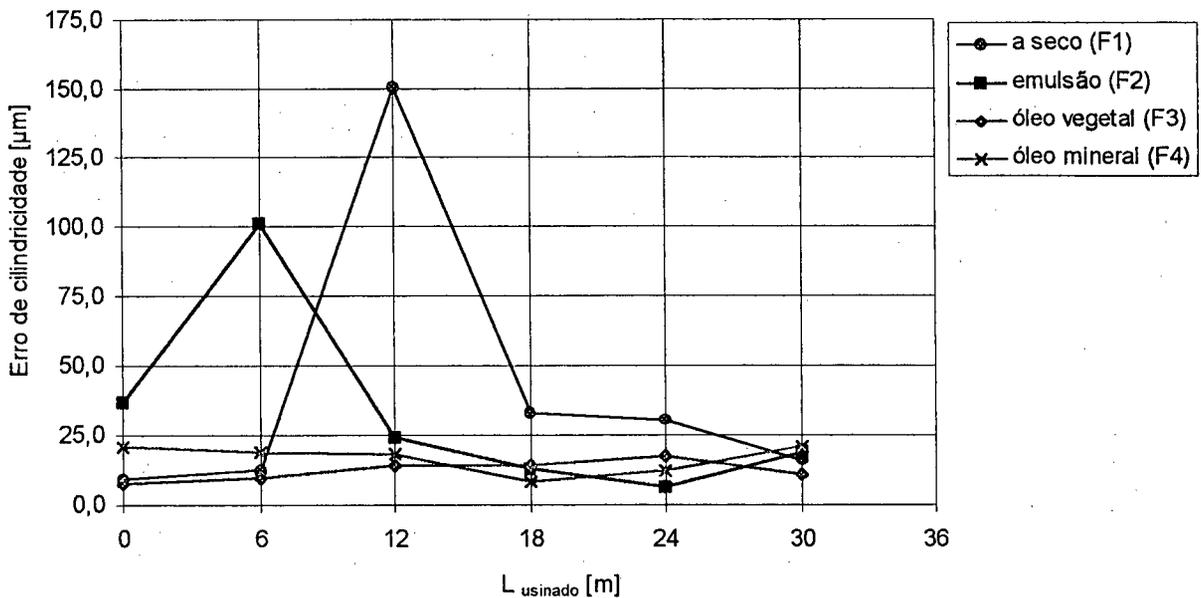
Erro de circularidade X $L_{usinado}$
 Ferramenta F; Metal-duro/TiN A3265TiN; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 91 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas as condições ensaiadas.

Torna-se difícil concluir por meio da análise da figura 91 qual das condições de refrigeração e lubrificação gerou melhores benefícios em relação ao erro de circularidade.

Mesmo assim, pode-se perceber que a usinagem a seco apresentou o pior desempenho dentre todas as condições ensaiadas, principalmente pela dispersão apresentada pelos valores.

4.6.6 Erro de Cilindricidade

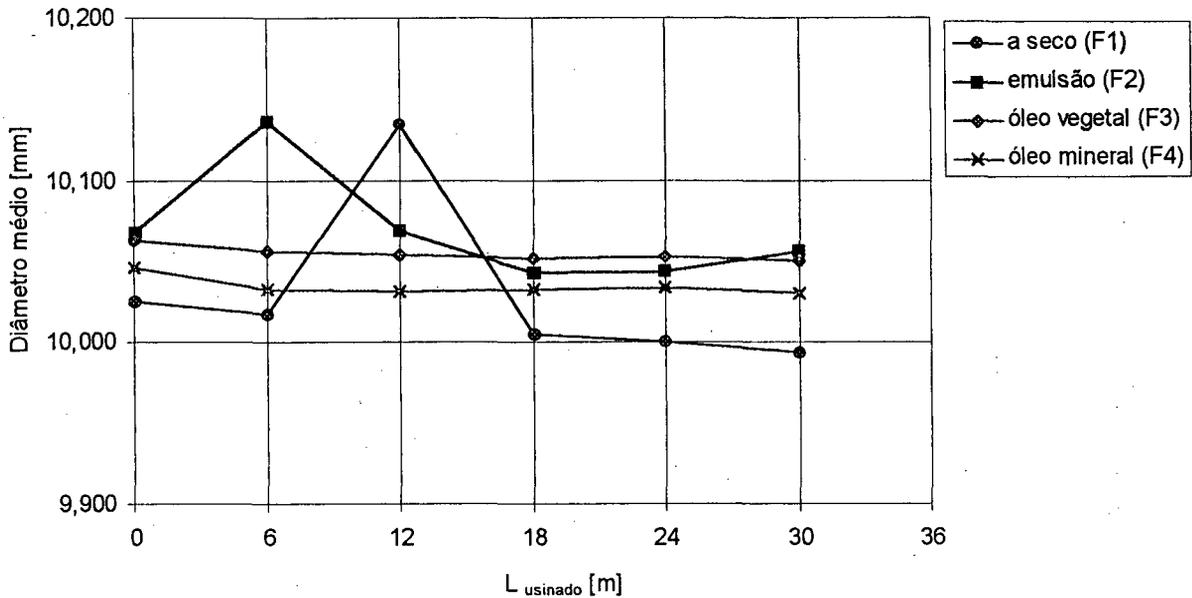


Erro de cilindridade X L_{usinado}
 Ferramenta F; Metal-duro/TiN A3265TiN; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 92 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas as condições ensaiadas.

Neste caso, os menores erros de circularidade foram gerados nas furações com MQFC, onde os dois tipos óleos apresentaram um desempenho muito estável e similar (Fig. 92). A usinagem a seco por sua vez apresentou um pico no erro de circularidade aos 12 m, como aconteceu anteriormente para o erro de circularidade e M_{II} , levando a crer que existe uma correlação entre estes parâmetros. A usinagem com emulsão também apresentou um pico aos 6 metros de usinagem, porém este comportamento não foi verificado nos parâmetros analisados anteriormente.

4.6.7 Diâmetro Médio do Furo



Diâmetro médio X L_{usinado}
 Ferramenta F; Metal-duro/TiN A3265TiN; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 93 – Tendência de evolução do diâmetro médio dos furos para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiN (lote F) em todas as condições ensaiadas.

Os dois casos em que se usinou com MQFC apresentaram um bom desempenho no comportamento evolutivo do diâmetro médio do furo (Fig. 93). Com esta técnica obteve-se furos dentro da classe IT7. A usinagem com emulsão e a seco apresentaram picos de valores aos 6 e 12 m, respectivamente, como já havia acontecido para o erro de cilindricidade, apresentando diâmetros dentro da classe IT12 (a seco) e IT11 (emulsão). Nestes dois casos os furos gerados apresentaram valores de diâmetro acima dos valores que são esperados na furação com brocas de metal-duro, ou seja, dentro da classe IT8.

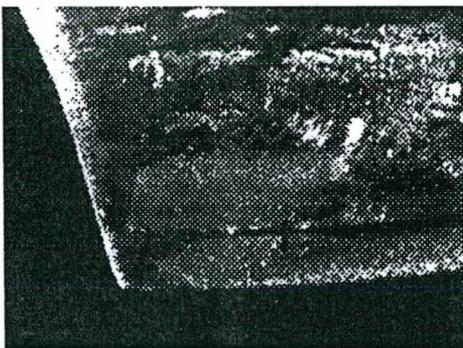
4.6.8 Considerações sobre os Resultados

A instabilidade na qualidade dos furos observada para este lote de ferramentas durante a usinagem a seco foi evidenciada também por outros autores como Weingaertner

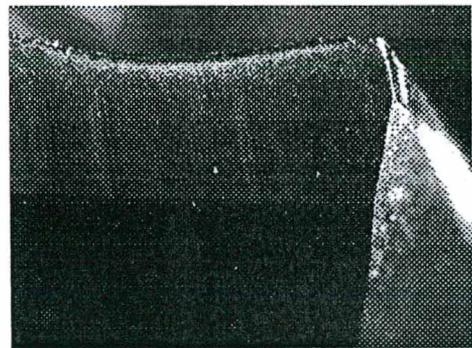
et al. [42], Heisel e Lutz [30] e Klocke e Gerschwiler [37]. Porém, em termos de desgaste e de força axial esta foi a condição que apresentou os melhores resultados. A usinagem com MQFC, principalmente a com óleo vegetal, apresentou resultados mais satisfatórios em praticamente todos os parâmetros apresentados e discutidos anteriormente. Provavelmente, a sua eficiência na refrigeração e lubrificação do processo, aliada a uma menor deterioração do revestimento, contribuíram para a obtenção destes resultados. A usinagem com emulsão se comparada com as outras condições de refrigeração e lubrificação testadas, mostrou-se ser benéfica apenas em termos de qualidade do processo. O desgaste, como também os esforços de corte, foram influenciados negativamente quando se empregou este produto.

4.7 Ferramentas de Metal-duro com Revestimento de Nitreto de Titânio e Alumínio – A3265TiAlN – (lote G).

Foram utilizadas quatro brocas de metal-duro revestidas com nitreto de titânio e alumínio, sendo que cada uma delas foi ensaiada em condições diferentes de refrigeração e lubrificação. A ferramenta ensaiada a seco (G1) quebrou no instante em que era iniciada a aquisição dos dados de força e momento, aos 30 m de usinagem. Deste modo, os últimos registros dos dados foi feito aos 24 m. Como poderá ser verificado nas últimas imagens adquiridas aos 24 m da ferramenta (Fig. 94), não houve um motivo aparente que a levasse ao colapso.



a) Face 2



b) Flanco 2

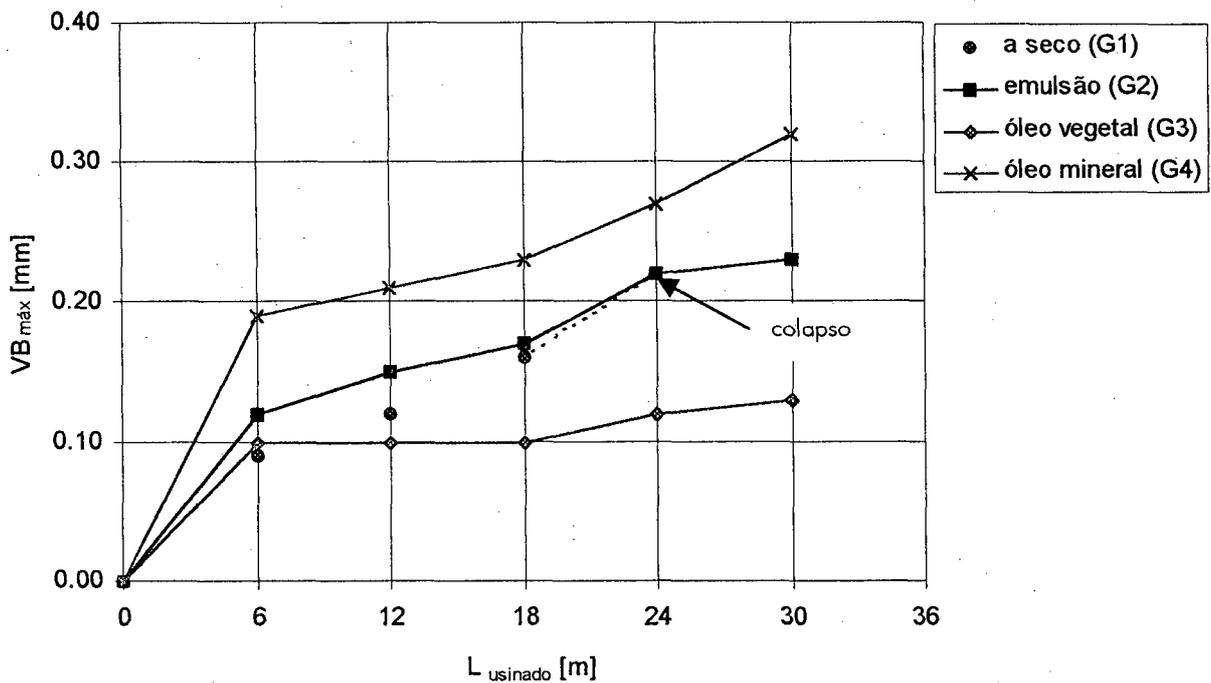
FIGURA 94 – Estado da ferramenta G1 que usinou a seco aos 24 m de usinagem.

Os códigos e as condições de ensaio utilizadas estão mostrados na tabela 14.

TABELA 14 – Ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (Lote G).

Código	Condição
G1	A seco
G2	Emulsão
G3	MQFC – óleo vegetal
G4	MQFC – óleo mineral

4.7.1 Desgaste de Flanco Máximo



Desgaste de flanco $VB_{m\acute{a}x} \times L_{usinado}$
 Ferramenta G; Metal-duro/TiAlN - A3265TFL; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

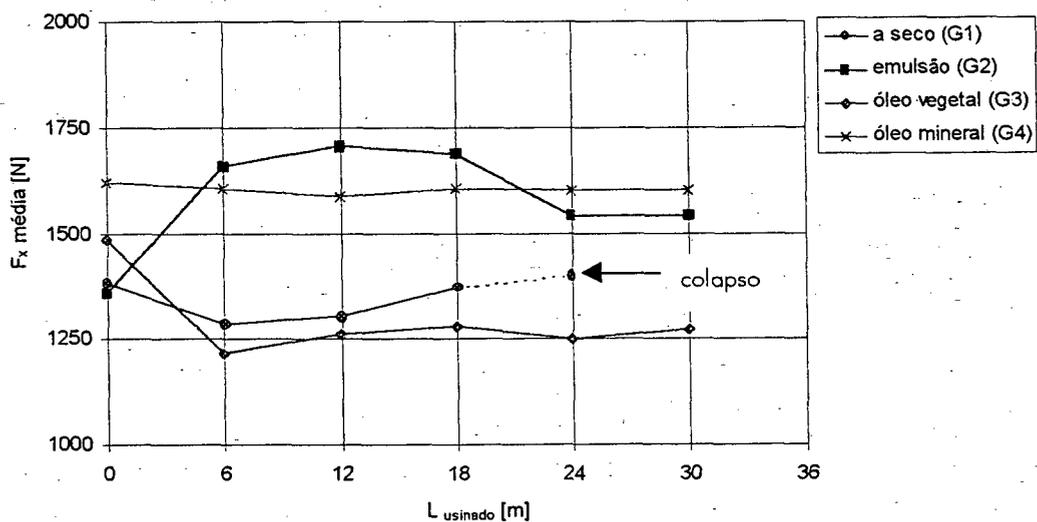
FIGURA 95 – Evolução da marca de desgaste de flanco máximo para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas as condições ensaiadas.

As ferramentas G1 e G2 que usinaram a seco e com emulsão respectivamente apresentaram, apesar de usinarem em condições de lubrificação e refrigeração completamente diferentes, um comportamento evolutivo da marca de desgaste de flanco

similar até momentos antecedentes ao colapso de G1 (Fig. 95). Este comportamento evidencia a boa resistência ao calor e aos mecanismos de desgaste como oxidação e difusão que o revestimento de TiAlN confere à ferramenta. Esta melhora na resistência da ferramenta a temperaturas elevadas através da utilização do TiAlN como material de revestimento já foi constatada por outros autores, como Tönshoff et al. [80] e Klocke et al. [53].

As ferramentas que usinaram com MQFC situaram-se nos dois extremos, ou seja, a G4 (óleo mineral) apresentou o pior desempenho enquanto que a G3 (óleo vegetal) o melhor. O desgaste apresentado por G4 aos 30 m foi aproximadamente 60% maior que o apresentado por G3 no mesmo ponto. Acredita-se que os óleos vegetais ajem eficientemente no isolamento térmico [80] da ferramenta e agridam menos o revestimento da ferramenta, preservando-o por mais tempo, o que acaba resultando em menores valores de desgaste.

4.7.2 Força Axial Média



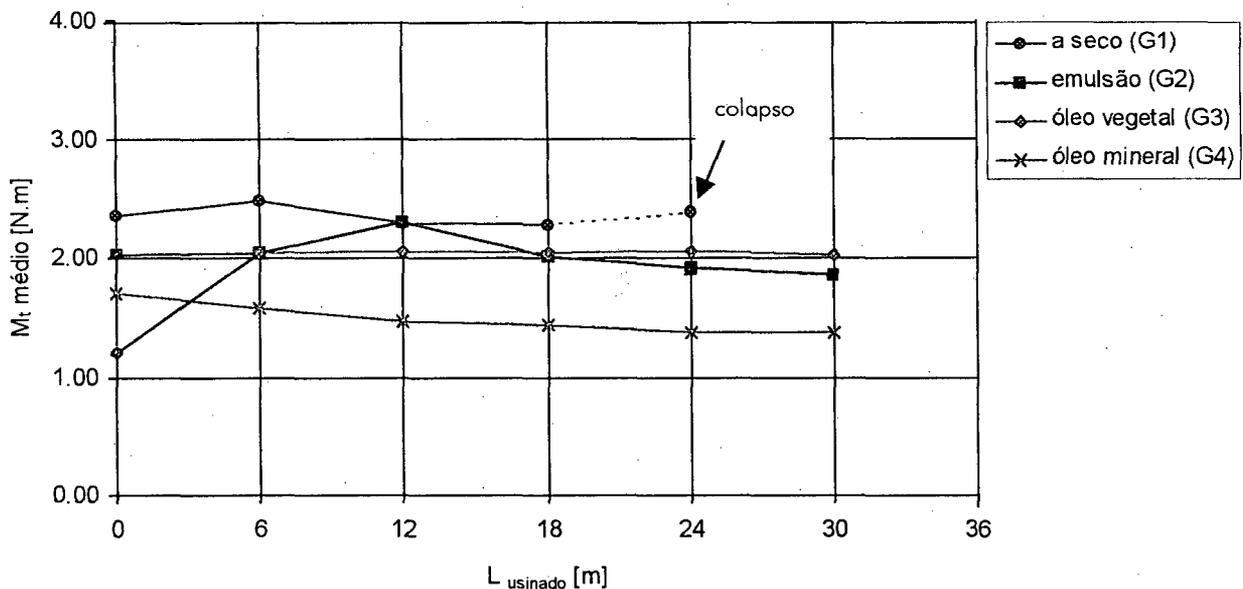
Força axial média X L_{usinado}
 Ferramenta G; Metal-duro/TiAlN - A3265TFL; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 96 – Tendência de evolução da força axial média para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas condições ensaiadas.

As ferramentas ensaiadas com emulsão (G2) e óleo mineral (G4) apresentaram os maiores valores de F_x , estando estes muito próximos entre si (Fig. 96). Porém, a broca que usinou com óleo mineral apresentou valores mais estáveis durante a usinagem. Conforme König [3], o maior poder de refrigeração deste produtos pode levar a esforços de corte maiores.

As brocas G1 (a seco) e G3 (óleo vegetal) também comportaram-se de forma relativamente semelhante até o colapso de G1. A diferença ocorreu nos seis primeiros metros de usinagem onde, para a usinagem com óleo vegetal, houve uma queda mais acentuada da F_x . Como a broca G1 quebrou, a G3 pode ser considerada como a que apresentou o melhor desempenho em termos da força axial de usinagem. Se a evolução de VB_{\max} for analisada (Fig. 96), percebe-se que a broca G3 apresentou os menores valores de desgaste.

4.7.3 Momento Torçor Médio

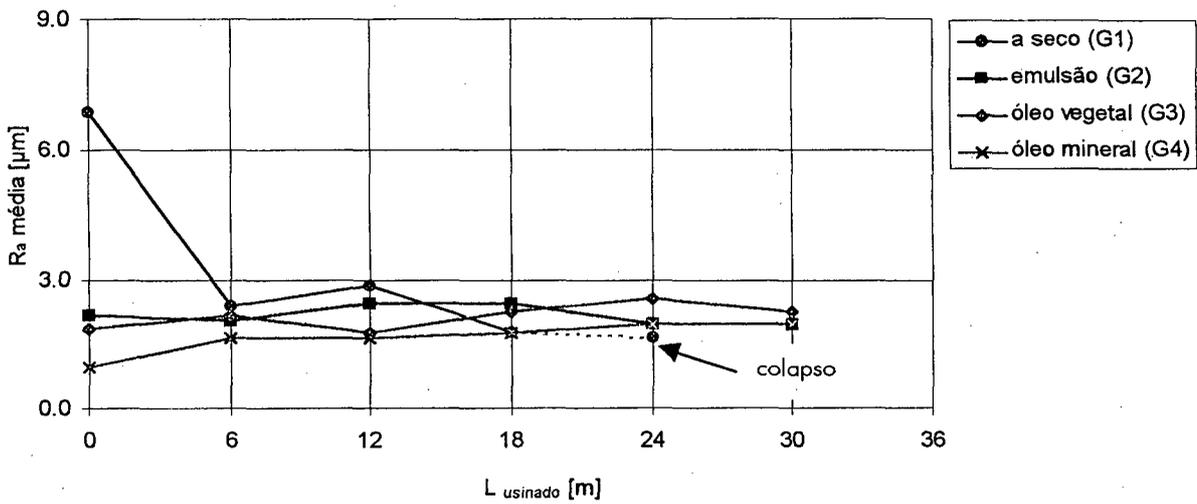


Momento torçor médio X L_{usinado}
 Ferramenta G; Metal-duro/TiAlN - A3265TFL; DIN6537K
 $d=10 \text{ mm}$; $v_c=75 \text{ m/min}$; $f=0,18 \text{ mm}$; $n=2353 \text{ rpm}$
 Material da peça: aço ABNT1040

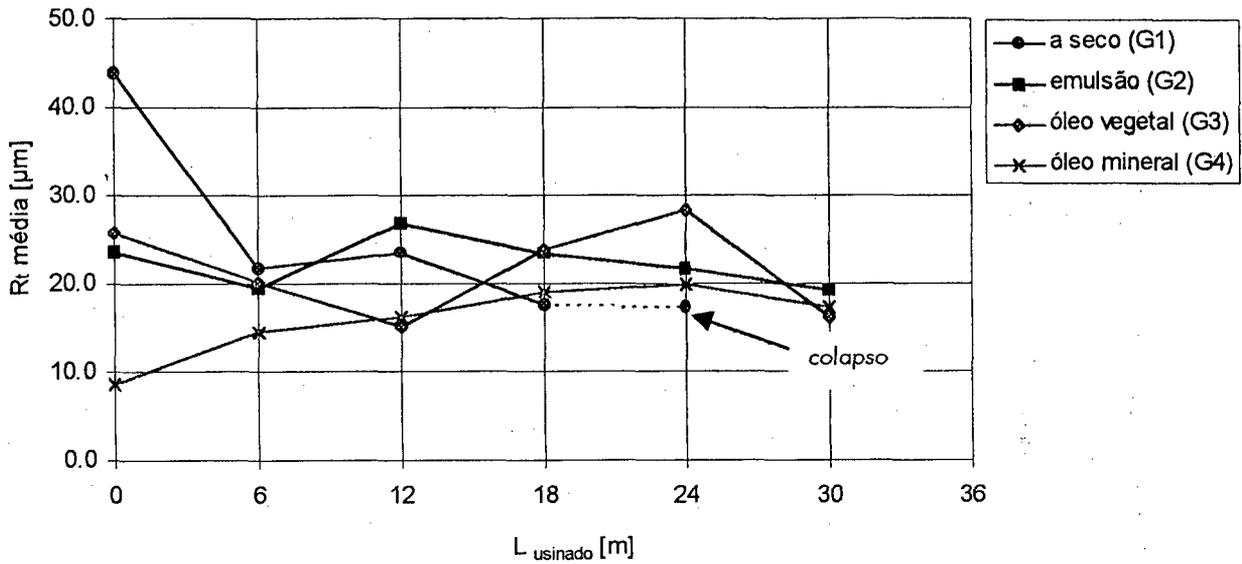
FIGURA 97 – Tendência de evolução do momento torçor médio para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas condições ensaiadas.

A usinagem a seco apresentou os maiores valores do M_{17} , como pode ser visto na figura 97. Nesta condição tem-se maior atrito entre as guias laterais e as paredes do furo. A usinagem com emulsão e óleo vegetal, apresentou valores próximos um dos outros principalmente a partir dos 6 metros. A furação com MQFC (óleo mineral) ocorreu de forma mais estável e com os menores valores de M_{17} .

4.7.4 Rugosidades R_a e R_t



Rugosidade R_a média X L usinado
 Ferramenta G; Metal-duro/TiAlN A3265TFL; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

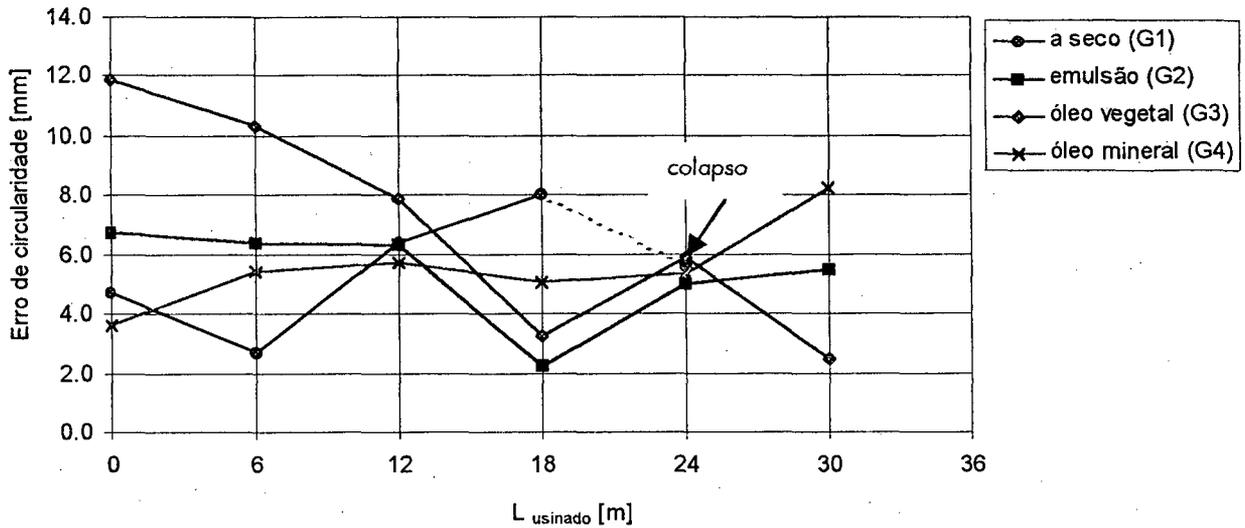


Rugosidade R_t média $\times L_{\text{usinado}}$
 Ferramenta G; Metal-duro/TiAlN A3265TFL; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 98 – Tendência de evolução das rugosidades R_a e R_t para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas as condições ensaiadas.

Os valores das rugosidades (Fig. 98), principalmente de R_a , em todas as condições ensaiadas estão muito próximos uns dos outros. Desta forma não é possível afirmar com exatidão qual das condições de lubrificação e refrigeração teve o melhor desempenho. Mesmo assim, pode-se perceber que a usinagem a seco apresentou uma queda acentuada tanto de R_a como de R_t logo nos 6 primeiros metros de usinagem, enquanto que a usinagem com MQFC (óleo mineral) gerou valores mais estáveis. A utilização da emulsão mostrou ter pouca influência na qualidade superficial quando o TiAlN é usado como revestimento.

4.7.5 Erro de Circularidade

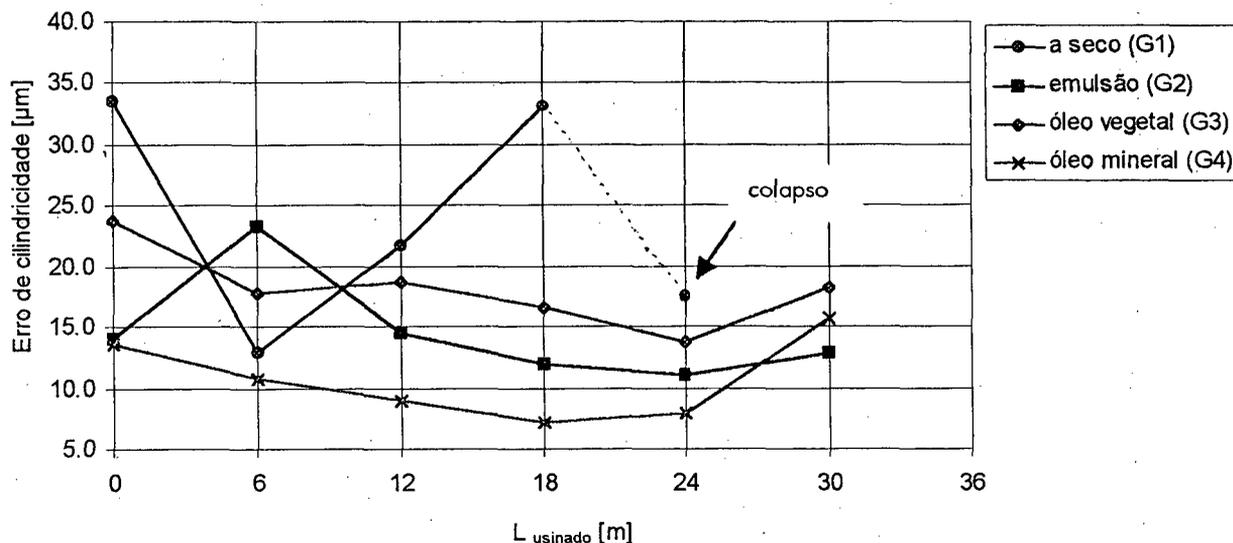


Erro de circularidade X L_{usinado}
 Ferramenta G; Metal-duro/TiAlN A3265TFL; DIN6537K
 d=10 mm; v_c=75 m/min; f=0,18 mm; n=2353 rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 99 – Tendência de evolução do erro de circularidade dos furos para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas as condições ensaiadas.

A usinagem utilizando óleo mineral aplicado em quantidades mínimas apresentou a melhor estabilidade dentre as condições ensaiadas principalmente até os 24m (Fig. 99). A usinagem com óleo vegetal apresentou a uma maior variação do erro de circularidade. As outras duas condições, usinagem a seco e com emulsão, mostraram uma maior instabilidade nos valores do erro de circularidade. Em geral, a usinagem com óleo mineral, devido à sua estabilidade, mostrou um desempenho relativamente melhor.

4.7.6 Erro de Cilindricidade

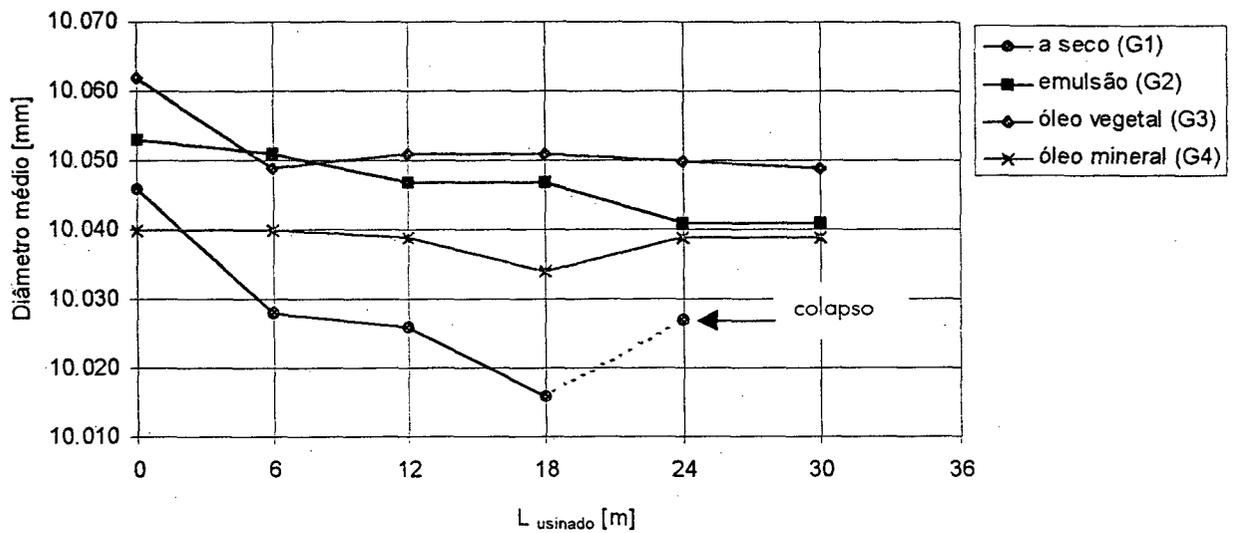


Erro de cilindridade X L_{usinado}
 Ferramenta G; Metal-duro/TiAlN A3265TFL; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 100 – Tendência de evolução do erro de cilindridade dos furos para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas as condições ensaiadas.

A usinagem com óleo mineral mais uma vez destacou-se por sua estabilidade e pelos menores valores apresentados até os 24 metros (Fig. 100). A usinagem com óleo vegetal apresentou maiores erros de cilindridade que a usinagem com emulsão e com óleo mineral. Mesmo assim mostrou uma estabilidade razoável. A usinagem com emulsão mostrou um bom desempenho apenas após os doze metros iniciais, sendo que antes disso foi muito instável.

4.7.7 Diâmetro Médio do Furo



Diâmetro médio X L usinado
 Ferramenta G; Metal-duro/TiAlN A3265TFL; DIN6537K
 $d=10$ mm; $v_c=75$ m/min; $f=0,18$ mm; $n=2353$ rpm
 Material da peça: aço ABNT1040

FIGURA 101 – Tendência de evolução do diâmetro médio dos furos para as ferramentas de metal-duro revestidas com TiAlN (lote G) em todas as condições ensaiadas.

Não fosse pela instabilidade e a quebra da broca G1, esta poderia ter tido um bom desempenho em relação à evolução do diâmetro médio do furo (Fig. 101). A seco, até o momento do colapso, conseguiu-se obter furos da classe IT9. Entretanto, a aplicação dos óleos em MQFC mostrou-se melhor pois os valores dos diâmetros foram mais estáveis. No caso da usinagem com óleo mineral os furos mantiveram-se dentro da classe IT5, a qual foi a menor classe obtida no ensaio deste lote de ferramentas. A furação com aplicação de óleo vegetal gerou valores do diâmetro médio dentro da classe IT7. A usinagem com emulsão teve um comportamento intermediário ao dos óleos principalmente entre 6 e 24 metros, gerando furos também dentro da classe IT7. É importante chamar a atenção para o fato de que todas as ferramentas que atingiram o comprimento final de usinagem programado geraram furos abaixo da classe IT8, a qual segundo Tönshoff et al. [4] é a que geralmente é alcançada com brocas de metal-duro.

4.7.8 Considerações sobre os Resultados

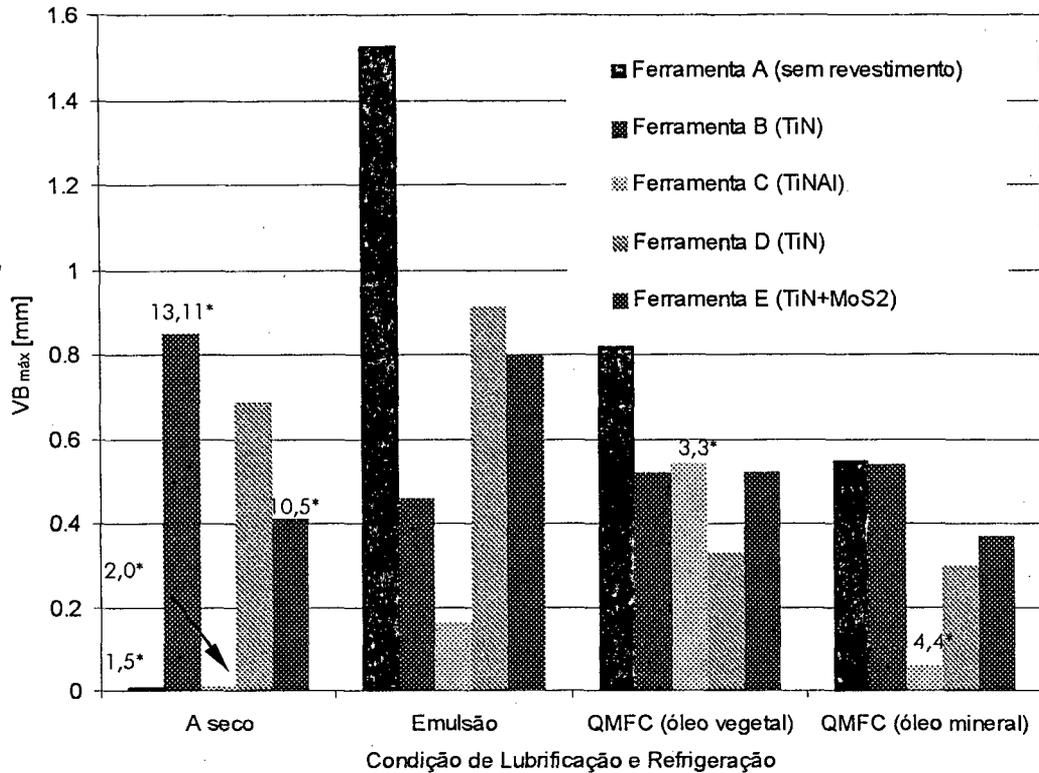
Após a apresentação e análise dos parâmetros mostrados, pode-se dizer a usinagem com MQFC apresentou melhores resultados. A usinagem com óleo vegetal mostrou um melhor desempenho no que diz respeito à força axial de corte, momento torçor e pela estabilidade dos valores na rugosidade. Já a usinagem com óleo mineral melhorou a qualidade dos furos com respeito ao erro de circularidade, cilindricidade e diâmetro médio. Provavelmente o seu poder de refrigeração aliado a uma menor deterioração do revestimento do que a causada pela emulsão, contribuiu para estes resultados. A usinagem a seco mostrou-se mais uma vez ser instável com relação à qualidade dos furos gerados, fato este já discutido anteriormente.

4.8 Análise em Função da Condição de Lubrificação e Refrigeração do Processo

Neste item o desempenho das ferramentas ensaiadas é analisado em função das condições de lubrificação e refrigeração testadas, tendo como parâmetro comparativo o desgaste máximo de flanco. Primeiramente discute-se o comportamento das brocas de aço-rápido, e em seguida o comportamento das brocas de metal-duro.

4.8.1 Ferramentas de Aço-rápido

Como comentado anteriormente, para os lotes de ferramentas de aço-rápido fizeram-se dois e até três ensaios (lote A) na condição de usinagem a seco. Por isso, na figura 102 os resultados mostrados nesta condição são referentes às brocas que atingiram o maior comprimento final de usinagem. Como nem todas as brocas de aço-rápido ensaiadas chegaram aos 15 m previamente estabelecidos como sendo o comprimento final dos ensaios, na figura 102 está indicado acima da barra de valores o comprimento máximo (em metros) que a ferramenta usinou. Quando nenhum valor é apresentado deve ser considerado que a ferramenta atingiu os 15 m programados.



* comprimento final de usinagem em metros.

FIGURA 102 – Valores máximos do desgaste de flanco $VB_{máx}$ para as brocas de aço-rápido ensaiadas em diferentes condições de lubrificação e refrigeração.

A usinagem a seco mostrou ser uma condição muito severa de trabalho para as ferramentas de aço-rápido, tanto para as não-revestidas como para as revestidas. Dentre as ferramentas ensaiadas nesta condição somente a broca D (TiN) atingiu o comprimento final de usinagem. É importante observar que esta ferramenta apresentou um desgaste de flanco inferior na usinagem a seco se comparado ao gerado na usinagem com emulsão. A ação térmica e química da emulsão pode ter acelerado o processo de desgaste do revestimento, levando assim a ferramenta a apresentar um $VB_{máx}$ maior do que na usinagem a seco.

A figura 102 mostra que na usinagem com emulsão o benefício que o revestimento proporciona às ferramentas em termos de redução do desgaste de flanco é evidente. As marcas de desgaste chegam a ser aproximadamente 40% (brocas D e E) a 70% (broca B) menores que as marcas da ferramenta sem revestimento. Este fato já foi constatado por

outros pesquisadores, como Tönshoff et al. [4] e Subramanian et al. [27], os quais afirmam que as ferramentas de aço-rápido revestidas podem alcançar tempos de vida quatro vezes maiores que as não-revestidas. Apesar da ferramenta C possuir características geométricas diferentes das outras brocas, decidiu-se por apresentar o seu comportamento na figura 102 juntamente com as outras ferramentas, pois o seu desempenho na usinagem com emulsão em termos de $VB_{máx}$ foi muito superior ao das outras brocas testadas. Em relação à broca A, a broca C apresentou um desgaste de flanco máximo aproximadamente 90% menor, em comparação à broca B 65 % menor, e no caso das brocas D e E, 80% menor.

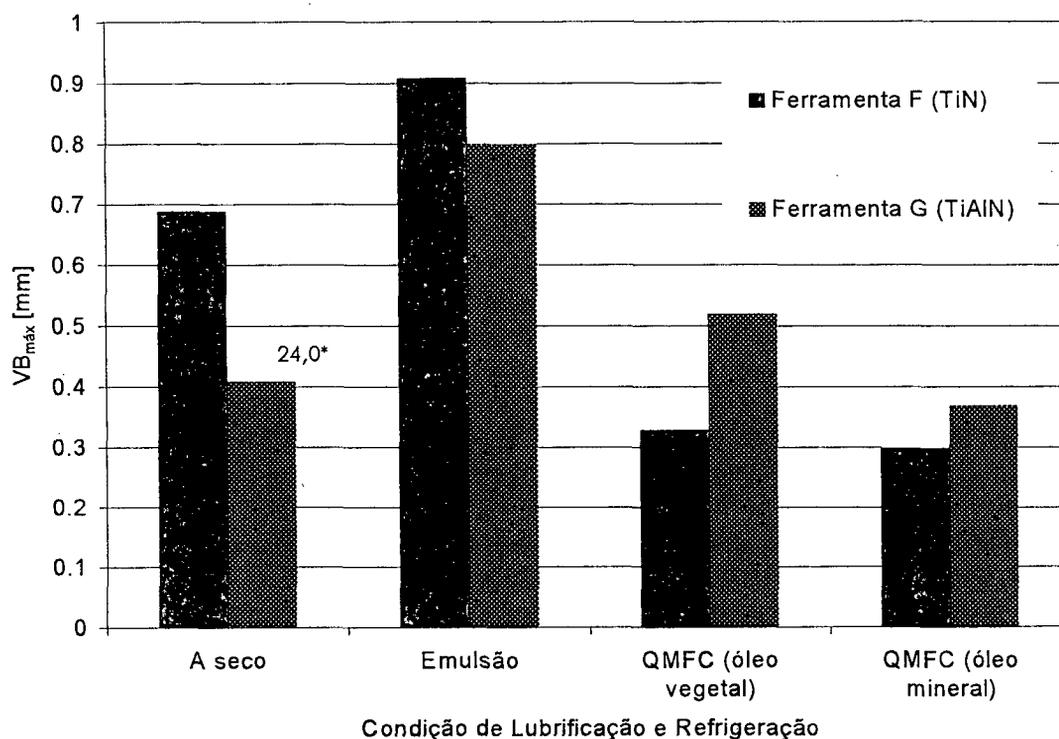
Na usinagem com óleo vegetal em mínima quantidade as ferramentas revestidas foram superiores, apresentando as menores marcas de desgaste de flanco aos 15 m de usinagem. Porém, nesta condição a diferença entre os resultados apresentados pelas ferramentas sem revestimento e com revestimento já não é tão grande como nos casos discutidos anteriormente. O desempenho da broca D revestida com TiN destaca-se nesta condição de lubrificação e refrigeração.

Na usinagem com óleo mineral, as ferramentas apresentaram desempenho muito similar, sendo um pouco melhor o apresentado pelas ferramentas revestidas com TiN (D) e TiN+MoS₂ (E).

Ao analisar a figura 102 procurando perceber o comportamento de cada tipo de ferramenta de um modo geral, fica claro que em termos de redução da evolução do desgaste de flanco, que para as ferramenta (A, D, E) a usinagem com mínima quantidade de fluido de corte foi a melhor condição de lubrificação e refrigeração. Para as brocas C e B a usinagem com emulsão apresentou melhores resultados.

4.8.2 Ferramentas de Metal-duro

Como a broca G ensaiada a seco não chegou aos 30 m previamente estabelecidos como comprimento final de ensaio, na figura 103 está mostrado acima da barra de valores o comprimento máximo (em metros) que a ferramenta usinou. Nos outros casos nenhum valor é apresentado, então deve ser subentendido que a ferramenta atingiu os 30 m programados.



* comprimento final de usinagem em metros.

FIGURA 103 – Valores máximos do desgaste de flanco $VB_{máx}$ para as brocas de metal-duro ensaiadas em diferentes condições de lubrificação e refrigeração.

A figura 103 mostra que a broca F (TiN) apresentou desempenho superior ao da G (TiAlN) na usinagem a seco, pois esta última quebrou antes dos 30 m. Na usinagem com emulsão, a broca revestida com TiAlN apresentou marcas de desgaste de flanco levemente inferiores às apresentadas pela broca revestida com TiN. Nos ensaios realizados com mínima quantidade de fluido de corte, em ambos os casos (óleo vegetal e óleo mineral), a ferramenta F foi melhor que a G.

Ao ser analisado o comportamento de cada ferramenta isoladamente nas quatro condições distintas de lubrificação e refrigeração, percebe-se que tanto para a ferramenta F quanto para a G os melhores resultados em termos de desgaste foram obtidos na usinagem com quantidade mínima de fluido de corte, sendo que a utilização do óleo vegetal apresentou desempenho levemente superior. A usinagem com emulsão, por sua vez, foi a pior condição utilizada para reduzir o desgaste de flanco. Este fato pode estar relacionado com a diminuição da temperatura no processo de usinagem do material. Klocke et al. [53] afirma que alguns tipos de revestimento, como o TiAlN, por exemplo, reduzem o mecanismo abrasivo de desgaste, como também o desgaste de flanco, pois forma camadas óxidas tendo como principal constituinte o Al. Deste modo, esta camada dura formada durante a usinagem age como uma barreira térmica e como uma reposição contínua do revestimento da ferramenta. Com a redução da temperatura no processo, acredita-se que este fenômeno é minimizado e até mesmo eliminado.

Outra hipótese a ser considerada é a proposta por Weingaertner [75], em que a redução média da temperatura pela refrigeração da raiz do cavaco leva a uma diminuição do fator de recalque, menor contato entre cavaco e ferramenta e mesmo para uma diminuição da força de avanço, a maiores pressões de contato, podendo levar a micro e macro-lascamentos do gume.

4.8.3 Considerações Finais

Apesar de serem geometricamente diferentes e usinarem com diferentes parâmetros de corte, algumas considerações sobre o desempenho das ferramentas de aço-rápido, principalmente as revestidas, em relação às ferramentas de metal-duro são importantes neste trabalho.

Uma análise geral dos resultados apresentados e discutidos neste capítulo mostra que a produtividade das brocas de metal-duro é superior, pois a velocidade de corte chega a ser aproximadamente 2,5 vezes maior do que a empregada na usinagem com as ferramentas de aço-rápido. Além disso, a resistência ao desgaste de flanco, a qualidade do processo e a estabilidade na evolução dos parâmetros de processo como força e momento é superior aos das ferramentas de aço-rápido. Então, apesar do custo de aquisição das ferramentas de metal-duro ser maior, segundo Cselle e Barimani [58] no momento em que o custo total de

usinagem for considerado, pode-se chegar à conclusão que este pode ser reduzido quando ferramentas mais caras forem utilizadas. Porém, este trabalho não tem como objetivo fazer esta análise econômica, sendo o comentário acima somente uma hipótese a ser considerada e investigada.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A usinagem a seco mostrou ser uma condição de trabalho muito severa para as brocas de aço-rápido, principalmente para as sem revestimento (lote A). Mesmo assim, também mostrou ser uma condição extrema para as brocas de aço-rápido revestidas. Os dois lotes de ferramentas (B e D) de aço-rápido revestidas com nitreto de titânio (TiN) apresentaram resultados diferentes nesta condição de ensaio. As duas ferramentas do lote B não atingiram o comprimento final de usinagem programado. No caso das ferramentas do lote D, foi possível chegar ao final do ensaio com uma das ferramentas, sendo que esta apresentou resultados satisfatórios até mesmo em termos de qualidade do processo. A usinagem a seco mostrou ser inviável para brocas de aço-rápido revestidas com nitreto de titânio e bissulfeto de molibdênio do lote E (TiN+MoS₂), como também para as do lote C (TiAlN), pois em ambos os casos as ferramentas não atingiram o comprimento final de usinagem.

Os resultados da furação a seco com broca de metal-duro revestida com nitreto de titânio foram satisfatórios. O único inconveniente está na qualidade do processo, que foi afetada negativamente. Porém, quando existe uma operação subsequente de acabamento, é uma alternativa a ser considerada. A broca de metal-duro revestida com nitreto de titânio e alumínio (TiAlN) não apresentou bom desempenho na usinagem a seco, sendo que a mesma entrou em colapso antes do comprimento final de usinagem programado. O fraco desempenho das ferramentas ensaiadas nesta condição pode ser justificado devido aos problemas que estão associados com o excesso de calor na usinagem, como por exemplo a ocorrência prematura de deformações que degradam a vida da ferramenta, as expansões térmicas na peça que dificultam a manutenção de tolerâncias dimensionais estreitas e, ainda, a rápida deterioração da qualidade superficial.

A usinagem com emulsão mostrou ser a melhor condição de refrigeração e lubrificação em termos de qualidade do processo para as brocas de aço-rápido revestidas e não-revestidas. A usinagem com MQFC, principalmente com óleo mineral, na maior parte

dos casos apresentou resultados muito próximos aos apresentados na usinagem com emulsão. Porém, esta condição destaca-se na redução do desgaste de flanco principalmente para as ferramentas revestidas. As brocas de aço-rápido revestidas com nitreto de titânio e alumínio (TiAlN) ensaiadas neste trabalho, mesmo não sendo indicadas para a usinagem do aço devido à sua geometria, apresentaram bons resultados principalmente em relação à rugosidade, desgaste máximo de flanco e diâmetro médio do furo. O comportamento de F_x e M_{11} , apesar dos valores elevados devido às características geométricas da ferramenta, foram muito estáveis.

A utilização de emulsão na usinagem com brocas de metal-duro, apesar da utilização ser muito difundida na indústria, não gerou benefícios ao processo. Pelo contrário, acabou levando a maiores valores de $VB_{máx}$. Dentre as condições ensaiadas, a usinagem com MQFC, principalmente com óleo vegetal, foi a que apresentou os melhores benefícios em termos de $VB_{máx}$, F_x e M_{11} , enquanto que com o óleo mineral obteve-se melhor qualidade no processo. A usinagem com emulsão, apesar de gerar resultados ligeiramente melhores aos gerados com o óleo vegetal (em termos de qualidade do processo), pode ser substituída pois pode gerar benefícios econômicos e ecológicos à empresa.

Os diferentes resultados apresentados na usinagem com as brocas de aço-rápido revestidas com TiN indicam que ferramentas fornecidas por diferentes fabricantes podem apresentar comportamento distinto.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Sugere-se que nos próximos trabalhos seja estudado mais profundamente o comportamento de cada tipo de ferramenta aqui apresentado. Ou seja, uma menor variedade, como por exemplo somente dois tipos de ferramentas, deve ser investigado. Desta maneira, deve-se procurar fazer repetições para cada tipo de ferramenta e condição de lubrificação e refrigeração testadas neste trabalho. Assim sendo, a confirmação ou não das tendências de comportamento aqui apresentadas poderá ser feita por meio de métodos estatísticos.

Recomenda-se que seja feita a investigação dos mecanismos de desgaste predominantes na furação com brocas helicoidais. O conhecimento destes fenômenos torna-se interessante para que haja uma melhor compreensão dos efeitos que a utilização

de diferentes tipos de meios lubri-refrigerantes e revestimentos de ferramentas podem trazer ao processo de furação com brocas helicoidais.

Deve-se investigar a influência que a otimização dos parâmetros de processo, como a velocidade de corte e o avanço, têm na usinagem a seco e com MQFC. Esta otimização poderá diminuir o tempo de contato entre o material da peça e a ferramenta, minimizando assim os efeitos que o excesso de calor provoca no processo.

A confirmação ou não da hipótese apresentada por Weingaertner [75], a qual sugere que a refrigeração da raiz do cavaco leva a uma redução do fator de recalque, a um menor contato entre cavaco e ferramenta e mesmo para uma diminuição da força de avanço, a maiores pressões de contato, o que pode levar a micro e macro lascamentos do gume fica como sugestão para um futuro trabalho investigativo.

Ainda como tema de futuros trabalhos sugere-se a investigação dos efeitos que outras condições de lubrificação e refrigeração, outros revestimentos, materiais de peça e de ferramentas podem ter na furação com brocas helicoidais. Uma análise econômica que possa confirmar a viabilidade ou não da usinagem a seco e em quantidades mínimas de fluido de corte na indústria brasileira deve ser realizada. É ainda, uma avaliação dos benefícios em termos ambientais que estas técnicas podem trazer à empresa e sociedade.

Finalmente sugere-se a investigação dos tipos e quantidade de meios lubri-refrigerantes mais empregados atualmente no setor metal-mecânico nacional, bem como o acompanhamento do ciclo de vida destes produtos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1970. 751 p.
- 2 SANDVIK COROMANT. *Modern metal cutting – a practical handbook*. Sweden: 1. ed. 1994. 840 p. ISBN 91972299-0-3.
- 3 KÖNIG, W. *Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren* (Tradução: Prof. Dr.-Ing WALTER L. WEINGAERTNER). Düsseldorf: 4. ed. VDI. 1990. 416 p.
- 4 TÖNSHOFF, H. et al. *Machining of holes – developments in drilling technology*. Annals of CIRP, v. 43, p. 551-561, 1994.
- 5 TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS HANDBOOK: *Machining*, 4. ed., v. 1, 1983. Society of Manufacturing Engineers. Dearbon, Michigan. p. 10.1–10.76.
- 6 STEMMER, C. E. *Ferramentas de corte I*. 3. ed. Florianópolis: Ed. UFSC. 1993, 249 p.
- 7 EL BARADIE, M. A. *Cutting fluids: part I. characterization*. Journal of Materials Processing Technology, v. 56, p. 786-797, 1996.
- 8 TEIXEIRA, C. R. *Minimização da quantidade de fluido de corte em processos de usinagem com ferramenta de geometria definida*. 1997. 42f. Exame de Qualificação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- 9 KLOCKE, F., EISENBLÄTTER, G. *Dry cutting*. Annals of the CIRP, v. 46, p. 519-526, 1997.

- 10 NETTO, A. B. **Óleos de corte: a vez dos verdes.** Revista Metal-Mecânica. p. 33-35. fev./mar. 1999.
- 11 BERSENKOWITSCH, H. **Medidas de segurança no manuseio de agentes refrigerantes.** Revista Máquinas e Metais, São Paulo, p. 24-33, fev. 2000.
- 12 TANIO, F. **Lubrificantes industriais: soluções mais eficientes e menos agressivas ao meio ambiente.** Revista Metal-Mecânica, São Paulo, p. 16-32, fev./mar. 1999.
- 13 BALL, A. **A survey of metalworking fluid mist in manufacturing plants.** Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, p. 18-22, Sept. 1997.
- 14 WILSEY, P. W. et al. **Exposure to inhalable and "total" oil mist aerosol by metal machining shop workers.** American Industrial Hygiene Assosiation, v. 57, p. 1149-1153, Dec. 1996.
- 15 SMITH, P. **Auto parts manufacturer decides to clear the air.** American Machinist, p. 84-86, 1996.
- 16 D'ARCY, J. B. **Metalworking fluids symposium.** American Industrial Hygiene Assosiation, v. 57, p. 1127-1129, Dec. 1996.
- 17 LAPIDES, M. A. **Cutting fluids expose metal workers to the risk of occupational dermatitis.** Occupational Healt & Safety, v. 63, p. 82-87, Apr.1994.
- 18 EL BARADIE, M. A. **Cutting fluids: part ii. recycling and clean machining.** Journal of Materials Processing Technology, v. 56, p. 798-806, 1996.
- 19 HUNSICKER, D. P. **Compatibility: metalworking fluid, machine tool, and lubricant.** Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, p. 366-372, May 1996.

20 MICHIGAN TECHNOLOGICAL UNIVERSITY. **Environmentally Conscious Manufacturing.**

Disponível em:

<www.me.mtu.edu/research/mfg/mtamri/ecm.doc.html> Acesso em 28 nov. 2000.

21 LUCKE, W. E. **Fluid formulation: a view into the future.** Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, p. 597-604, Aug. 1996.

22 SMITH, P. L. **Coolants and cancer: fact or fiction?** American Machinist, p.46-50, Dec. 1996.

23 VOTAW, A. L., NEWMAN, M. A. e McCAMMON, J. B. **Saving your skin: how to reduce the risk of cutting oil rash.** Tooling & Production, p. 41-42, Feb. 1992.

24 EVERSHEIM, et al. **Manufacturing excellence in global markets.** London: Chapman & Hall, 1997, p. 339-399.

25 GÜHRING. **Hartstoffbohrer: schon voll ausgereizt? Die Ratioboherer und ihre praxisgerechte Anwendung.** Deutschland, 1997, 156 p.

26 ZELINSKI, P. **The fast track to high speed drilling.** Modern Machine Shop, p. 62-71, June 1998.

27 SUBRAMANIAN, C. et al. **Performance evaluation of tin-coated twist drills using force measurement and microscopy.** Surface and Coatings Technology, v. 62 p. 641-648, 1993.

28 NOVASKI, O., DÖRR, J. **Usinagem sem refrigeração.** Revista Máquinas e Metais, São Paulo, p. 18-27, mar. 1999.

29 KLOCKE F., GERSCHWILER, K. **Tronckenbearbeitung: Grundlagen, Grezen, Perspektiven.** VDI Berichte, n. 1240, p. 1-40, Feb. 1996.

- 30 HEISEL, U., LUTZ, M. **Pesquisa de fluidos de refrigeração e lubrificação.** Revista Máquinas e Metais, São Paulo, p. 40-50, maio 1998.
- 31 GRAHAM, D. **Going dry.** Manufacturing Engineering, p. 72-78, Jan. 2000.
- 32 BURGESS, W. A. **Impact of emerging technologies on occupational health.** American Industrial Hygiene Association Journal, v. 58, p. 469-473, July 1997.
- 33 ARONSON, R. B. **Why dry machining?** Manufacturing Engineering, v. 114, p. 33-38, Jan. 1995.
- 34 KÖNIG, W., RUMMENHÖLLER, S. **As indústrias estão tendo que orientar ecologicamente seus processos produtivos.** Revista Máquinas e Metais, p. 22-29, abr. 1998.
- 35 GRASSON, T. J. **Cloudy forecast for dry machining.** American Machinist, p. 47-50, Mar. 1997.
- 36 POPKE, H., EMMER, T. e STEFFENHAGEN, J. **Environmentally clean metal cutting process – machining on the way to dry cutting.** Proc. Instn. Mech. Engrs., v. 213 part B, p. 329-332, 1999.
- 37 TEIXEIRA, C. R., SCHROETER, R. B. e WEINGAERTNER, W. L. **Aspectos ecológicos nos processos de usinagem.** Revista Metal-Mecânica, São Paulo, p. 68-76, jun./jul. 1999.
- 38 HEISEL, U. et al. **A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte.** Revista Máquinas e Metais, p. 22-38, fev. 1998.
- 39 KUBEL, E. **Coatings crank up tool performance.** Manufacturing Engineering, p. 40-46, jan. 1998.
- 40 TEETER, F. J. **Coating takes place of coolant.** American Machinist, p. 50-52, 1999.

- 41 TEIXEIRA, C. R. **Influência dos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de aço-rápido na qualidade dos furos produzidos.** 1995. 110f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- 42 WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R. B. e TEIXEIRA, C. R. **Minimização do fluido de corte – influências tecnológicas no processo de furação.** São Paulo: X Simpósio de Engenharia Automotiva. 1999.
- 43 BRINKSMEIER, E. **Prediction of tool fracture in drilling.** Annals of CIRP, v. 39, p. 97-100, 1990.
- 44 KANAI, M. et al. **Statistical characteristics of drill life for the standardized performance tests.** Annals of CIRP, v. 27, p. 61-66, 1978.
- 45 WERNERT, K., ADAMS, F. J. **Furação com brocas helicoidais de ponta de carbeto e refrigerante a alta pressão.** Revista Máquinas e Metais, São Paulo, n. 386, p. 22-30. mar. 1998
- 46 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6176: Brocas helicoidais.** Rio de Janeiro, 1978.
- 47 STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II.** 2. ed. Florianópolis: Ed. UFSC, 1995, 326 p., Bibliografia: p. 1-32.
- 48 WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R. B. **Fundamentos de usinagem, furação, torneamento interno, mandrilamento e rebarbação.** (1º Relatório do Convênio Rudolph-LMP). Florianópolis, 1993, 102 p.
- 49 SKF Ferramentas S.A. **Manual técnico SKF.** São Paulo, 1987, 261 p.

- 50 EDWARDS, R. **Cutting tools**. 1 ed. London: The Institute of Materials, 1993, 197 p.
- 51 GÜHRING. **Precision cutting tools – standard ranges**. 6. ed., Germany, 1996, 980 p.
- 52 TITEX PLUS. **Catálogo 98**. São Paulo, 1998, 508 p.
- 53 KLOCKE, F. et al. **Improved cutting processes with adapted coating systems**. Annals of CIRP, v. 47, p. 65-68, 1998.
- 54 SMITH, P. L. **Better coatings and tools step up production**. American Machinist, p. 120-121, 1996.
- 55 SCHROETER, R. B. **Tecnologia da usinagem com ferramenta de geometria definida**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Mecânica de Precisão, Apostila.
- 56 KUSTAS, F. M., FEHREHNBACHER, L. L. e KOMANDURI, R. **Nanocoatings on cutting tools for dry machining**. Annals of CIRP, v. 46, p. 39-42, 1997.
- 57 SU, Y. L. et al. **Comparison of tribological behavior of three films – TiN, TiCN and CrN – grown by physical vapor deposition**. Wear, n. 213, p.165-174, 1997.
- 58 CSELLE, T., BARIMANI, A. **Today's applications and future developments of coatings for drills and rotating cutting tools**. Surface and Coatings Technology, n. 76-77, p. 712-718, 1995.
- 59 LEWIS, M. **Five best bets for the machine-tool industry**. American Machinist, p. 79-80, 1997.
- 60 RAYMOND, M. K. **Coatings increases speeds and feeds**. American Machinist, p. 122-123, 1996.

- 61 CSELLE, T. **Are you ready for Y2K tooling?** American Machinist, p. 52-58, Apr. 1999.
- 62 SMITH, I. J. et al. **Dry cutting performance of HSS twist drills coated with improved TiAlN.** Surface and Coatings Technology, n. 90, p. 164-171, 1997.
- 63 KUBEL, E. **Manufacturing tomorrow's supercars.** Manufacturing Engineering, p. 58-65, June 1998.
- 64 ARNOLD, D. B., MOMPER, F. J. **Machining challenges.** Manufacturing Engineering, p. 62-68, Nov. 1997.
- 65 PEYRE, J. P., DUCHATEAU, D. **As perspectivas são de uma grande evolução dos revestimentos PVD e CVD.** Revista Máquinas e Metais, p. 42-50, abr. 1995.
- 66 **ADVANCED PROCESSES DEPOSIT HIGH-TECH MATERIALS.** American Machinist, p. 35-37, March 1995.
- 67 HEINE, H. J. **Dry machining – a promising option.** American Machinist, p. 92-94, Aug. 1997.
- 68 SANDVIK. **O mundo da usinagem - informativo técnico-comercial.** p. 19-21, 1999.
- 69 FURNESS, R. J., WU, C. L. e ULSOY, A. G. **Statistical analyses of the effects of feed, speed, and wear on hole quality in drilling.** Sensor and Signal Processing for Manufacturing ASME, v. 55, p. 97-112, 1992.
- 70 WEINGAERTNER, W. L. et al. **Monitoramento da furção através da emissão acústica e da força de avanço.** COBEM-CIDIM 1995.
- 71 HOSHI, T., ZHAO, H. **Study of a high performance drill geometry.** Annals of CIRP v. 38, p. 87-90, Jan. 1989.

72 ADACHI, K. et al. A study on drilling of SUS304 by TiN-coated drills. *Buil. Japan Society of Precision Engineering*, v. 24 n. 3, p. 200-205, Sep. 1990.

73 LENZ, E., MEYER, J. E. e LEE, D. G. *Investigation in drilling*. *Annal of CIRP*, v. 27, p. 49-52, Jan. 1978.

74 MESQUITA, N. G. M. *Avaliação e Escolha de uma Superfície Segundo sua Função e Fabricação*. 1992. 141f. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

75 WEINGAERTNER, W. L. discussão técnica [maio 2001]. Orientado: P. R. A. Castro. Florianópolis: UFSC, 2001.

76 GLENN, T. F., KLINE, F. V. *Opportunities and market trends in metalworking fluids*. *Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, p. 31-33, Aug. 1998.

77 CASTRO, P. R. A. *Minimização e eliminação do fluido de corte no processo de furação*. Projeto de Dissertação 1999. 22f. (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

78 THREADGILL, J., BAILEY, M. *Exploring the options for coolant management*. *American Machinist*, p. 78-79, Aug. 1995.

79 TITEX PLUS – *Dry cutting*. Disponível em:

<www.titex.com/en/presse/etrcken.html> acessado 15 de maio 1999.

80 KOEPFER, C. *Between wet cutting and dry is damp cutting*. *Modern Machine Shop*, p. 90-96, May 1997.

- 81 SCHROETER, R. B., TEIXEIRA, C. R. Proposta de metodologia para medição do desgaste em ferramentas de corte de geometria definida. In: Conem 2000 – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Anais. Natal. 9 p. 2000.
- 82 GUEHRING AUTOMATION. Instruction manual for test measuring gauge – guehring PG-100. Federal Republic of Germany, 26 p.
- 83 PINTO, F. W. Medição das forças de usinagem utilizando plataformas piezelétricas. 1999. 74f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis.
- 84 PROMAX PRODUTOS MÁXIMOS S.A. IND. E COM. Informações técnicas – MaxLub Recut 2, São Paulo, 1 p., 1998.
- 85 PROMAX PRODUTOS MÁXIMOS S.A. IND. E COM. Certificado de análise W5K857 – MaxLub B5G72, São Paulo, 1 p., 1998.
- 86 I. TERSTEGEN CHEMISCH – TECHNISCHE PRODUKTE GmbH. Technische information IT-Micro 4300, Deutschland, 3 p., 1994.
- 87 I. TERSTEGEN CHEMISCH – TECHNISCHE PRODUKTE GmbH. Preisliste micJet 150/250, Deutschland, 3 p. 1997.
- 88 VERLAG EUROPA- LEHRMITTEL. Tabellenbuch metal. Nourney: 1985, 252 p., Bibliografia: p. 92.
- 89 SOUZA, A. R., OLIVEIRA A. L. Garantia da confiabilidade metrológica na medição por coordenadas. Fundação CERTI, LABMETRO, Apostila: 2001, 210 p.
- 90 FIDELIS G. C., VEIGA, C. L. Metrologia dimensional - técnicas de certificação de instrumentos segundo normas ISO. Fundação CERTI, LABMETRO, Apostila: 1996, 263 p.

7 ANEXOS

A Dados do Material dos Corpos de Prova

Material	Aço ABNT 1040
Fabricante	Gerdau - Aços Finos Piratini
Composição química [%]	C (0,40); Mn (0,72); P (0,013); S (0,019); Si (0,22); Cr (0,10); Ni (0,09); Mo (0,02); Al (0,013); Cu (0,16); N ₂ (0,0072).
Normas equivalentes	SAE AISI/ASTM 1038/1040, AFP1040, DIN C40, Ck40, Cm40, UNI C40, C41, JIS S40C, BS080A40, AFNOR C40.
Dureza [HB]	167

B Dados das Geometrias, dos Materiais e Revestimentos das Ferramentas do Fabricante A

Aço-rápido	
Composição [%]	C (0,9); Cr (4,2); Mo (5,0); V (2,0); W (6,5)
Microdureza [HV]	820 a 900
Aço-rápido especial	
Composição [%]	C (0,9); Cr (4,2); Mo (5,0); V (2,0); W (6,5); Co (4,8)
Microdureza [HV]	850 a 900

Nitreto de titânio (TiN)	
Composição	Titânio e nitrogênio
Dureza [HV]	2200
Espessura [μm]	1,5 – 3,0
Coef. de atrito em relação ao aço	0,4
Cor	Dourado
Coef. de transferência de calor [kW/mK]	0,07
Temperatura máxima de aplicação [°C]	800
Bissulfeto de molibdênio (MoS₂) – Fabricante A	
Composição	Molibdênio e enxofre
Dureza [HV]	30
Espessura [μm]	0,2 – 0,5
Coef. de atrito em relação ao aço	0,05 – 0,1
Cor	Verde oliva escuro

Coef. de transferência de calor [kW/mK]	30,1
Temperatura máxima de aplicação [°C]	800

Especificação	Ângulos [°]				
	L _{gume transv} [mm]	Ponta (σ)	Saída (γ)	Gume transversal (χ)	Incidência (α)
651	0,90	120	28	55	13
651 E	0,90	120	28	55	13

C Dados das Geometrias, dos Materiais e Revestimentos das Ferramentas do Fabricante B

Aço-rápido	
Composição [%]	C (0,82); Cr (4,0); Mo (5,0); V (2,0); W (6,5)
Aço-rápido especial	
Composição [%]	C (0,82); Cr (4,5); Mo (5,0); V (2,0); W (6,0); Co (5,0)
Metal-duro	
Composição [%]	77 WC; 11,5 Ti/Ta (Nb)C; 11,5 Co
Microdureza [HV]	1400
Classe	P40
Tamanho de grão [μ m]	2-3
Resist. à flexão [N/mm ²]	2200

Nitreto de titânio (TiN)	
Composição	Titânio e nitrogênio
Dureza [HV]	2000
Cor	Dourado
Nitreto de titânio e alumínio (TiAlN)	
Composição	Titânio, alumínio e nitrogênio
Dureza [HV]	3000
Cor	Azul acinzentado

Especificação	Ângulos [°]				
	L _{gume transv} [mm]	Ponta (σ)	Saída (γ)	Gume transversal (χ)	Incidência (α)
A1211	0,93	120	28	54	13
A1211TiN	0,93	120	28	54	13
A3265TiN	0,20	140	25	70	8
A3265TFL	0,20	140	25	70	8
A1246TFL	1,00	140	28	60	16

D Dados dos Produtos Lubri-refrigerantes

Emulsão	
Nome comercial	Maxlub Recut 2
Fabricante	Bardhal
Tipo	Miscível com água – sintético com aditivo EP
Cor (visual)	Verde fluorescente
Densidade 20/4°C	1,0249
Índ. de refração (6% em água)	1,3354
pH	9,3
Espuma	0/0

Óleo mineral	
Nome comercial	Maxlub B5G725
Fabricante	Bardhal
Tipo	Não miscível com água – óleo mineral
Cor (visual)	Âmbar
Densidade 20/4°C	0,9049
Viscosidade cinemática a 40°C [mm ² /s]	34,94
Viscosidade cinemática a 100°C [mm ² /s]	5,481
Água por crepitação	ausente

Óleo vegetal	
Nome comercial	IT-MICRO 4300
Fabricante	I. Terstegen
País de origem	Alemanha
Tipo	Não miscível com água – óleo vegetal
Cor (visual)	Âmbar
Densidade 20/4°C	0,9
Viscosidade cinemática a 40°C [mm ² /s]	33-36

E Dados do Atomizador Pneumático para Aplicação em QMFC

Atomizador para aplicação em QMFC	
Modelo	MicJet 150
Fabricante	I. Terstegen
País de origem	Alemanha
Volume do recipiente [l]	1,5
Quantidade máxima de fluido [l]	1,3
Pressão mínima [bar]	0,5
Pressão máxima [bar]	4,0
Alimentação	Manual
Controle ar/líquido	Válvula tipo agulha
Dimensões [mm]	127X127X237
Controle do nível	visual
Consumo de ar [l/min]	30

F Dados da Máquina-ferramenta

Tipo	Fresadora CNC
Modelo	Polaris F400
Fabricante	ROMI
País de origem	Brasil
Potência de acionamento [kW]	15
Rotação máxima [rpm]	6000
Avanço máximo [mm/min]	30000
Cursos dos eixos (X, Y, Z) [mm]	(710, 420, 600)
Erros de posicionamento dos eixos (X, Y, Z) [μ m]	(20, 30, 10)

G Formulário de Acompanhamento dos Ensaios

ENSAIO 11	Data: / /								
FLUIDO: a seco	Hora: :								
FERRAMENTA: A326STiN	AVANÇO:								
CODIGO: MN31S/F1	ROTAÇÃO:								
MATERIAL: Metal duro	CP aq.:								
REVESTIMENTO: TiN	faq.:								
FABRICANTE: Tifex	faq.:								

Lusinagem	Arquivo	Gume T. (topo)	Gume T. (lado)	Face 1	Face 2	Flanco 1	Flanco 2	Guia/quina 1	Guia/quina 2
0m	f1000.tif	HGTT_1000.tif	HGTL_1000.tif	HFA1_1000.tif	HFA2_1000.tif	HFL1_1000.tif	HFL2_1000.tif	HGL1_1000.tif	HGL2_1000.tif
3,0m	f1030.tif	HGTT_1030.tif	HGTL_1030.tif	HFA1_1030.tif	HFA2_1030.tif	HFL1_1030.tif	HFL2_1030.tif	HGL1_1030.tif	HGL2_1030.tif
6,0m	f1060.tif	HGTT_1060.tif	HGTL_1060.tif	HFA1_1060.tif	HFA2_1060.tif	HFL1_1060.tif	HFL2_1060.tif	HGL1_1060.tif	HGL2_1060.tif
9,0m	f1090.tif	HGTT_1090.tif	HGTL_1090.tif	HFA1_1090.tif	HFA2_1090.tif	HFL1_1090.tif	HFL2_1090.tif	HGL1_1090.tif	HGL2_1090.tif
12,0m	f1120.tif	HGTT_1120.tif	HGTL_1120.tif	HFA1_1120.tif	HFA2_1120.tif	HFL1_1120.tif	HFL2_1120.tif	HGL1_1120.tif	HGL2_1120.tif
15,0m	f1150.tif	HGTT_1150.tif	HGTL_1150.tif	HFA1_1150.tif	HFA2_1150.tif	HFL1_1150.tif	HFL2_1150.tif	HGL1_1150.tif	HGL2_1150.tif
18,0m	f1180.tif	HGTT_1180.tif	HGTL_1180.tif	HFA1_1180.tif	HFA2_1180.tif	HFL1_1180.tif	HFL2_1180.tif	HGL1_1180.tif	HGL2_1180.tif
21,0m	f1210.tif	HGTT_1210.tif	HGTL_1210.tif	HFA1_1210.tif	HFA2_1210.tif	HFL1_1210.tif	HFL2_1210.tif	HGL1_1210.tif	HGL2_1210.tif
24,0m	f1240.tif	HGTT_1240.tif	HGTL_1240.tif	HFA1_1240.tif	HFA2_1240.tif	HFL1_1240.tif	HFL2_1240.tif	HGL1_1240.tif	HGL2_1240.tif
27,0m	f1270.tif	HGTT_1270.tif	HGTL_1270.tif	HFA1_1270.tif	HFA2_1270.tif	HFL1_1270.tif	HFL2_1270.tif	HGL1_1270.tif	HGL2_1270.tif
30,0m	f1300.tif	HGTT_1300.tif	HGTL_1300.tif	HFA1_1300.tif	HFA2_1300.tif	HFL1_1300.tif	HFL2_1300.tif	HGL1_1300.tif	HGL2_1300.tif
Observações:									

H Dados da Plataforma Piezolétrica e dos Amplificadores

Modelo	9273
Fabricante	Kistler Instrumente AG
País de origem	Suíça
Faixa de calibração [N]	0 - 15000N
Linearidade [%]	≤ 0,3
Incerteza da medição [%]	≤ 1
Temperatura de utilização [°C]	0...70

Canal F_x	
(utilizado para a medição da força axial na direção Z em relação à da mesa da máquina-ferramenta)	
Cabo	1
Canal	1
Amplificador	A

Faixa de calibração [N]	0 - 6000
T (sensibilidade do cristal) [pC/N]	1,96
S (ordem de grandeza da força neste canal) [N/V]	6,0 E+2
Equação de conversão de sinais	$F=(\text{sinal}-2047,5)/0,3498$
Incerteza de medição [N]	60

Canal M₁ (utilizado para a medição do momento torçor na direção Z em relação à da mesa da máquina-ferramenta)	
Cabo	2
Canal	2
Amplificador	B
Faixa de calibração [Nm]	0 - 11
T (sensibilidade do cristal) [pC/N]	1,65
S (ordem de grandeza da força neste canal) [Nm/V]	1,10 E+2
Equação de conversão de sinais	$F=(\text{sinal}-2047,5)/1,8554$
Incerteza de medição [Nm]	0,25

I Dados da Câmera CCD

Modelo	TM-7CN
Fabricante	Pulnix American Inc.
País de origem	Estados Unidos
Imagens	1/2" Interline transfer CCD
Pixel	768 (h) x 494 (v)
Tamanho de célula [µm]	8,4 X 9,8
Varredura	525 linhas 60 Hz
Sincronismo	Cristais internos
Resolução	570 (h) x 350 (v)
Iluminação mínima	0,5 lux (F=1,4)
Potência	19-12 V DC, 220 mA
Temperatura de operação [°C]	-10 a 50

J Dados da Máquina de Medir por Coordenadas

Tipo	Mitutoyo Bright
Modelo	BRT-504
Fabricante	Mitutoyo
País de origem	Japão
Cursos dos eixos (X, Y, Z) [mm]	(500, 400, 400)
Incremento digital [μm]	0,1
Incerteza de medição [μm]	(3,56L/50)