

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FURAÇÃO DA LIGA DE TITÂNIO Ti6Al4V COM MÍNIMAS QUANTIDADES DE FLUIDO
DE CORTE

TESE DE DOUTORADO

RODRIGO PANOSSO ZEILMANN

Florianópolis, março de 2003

**FURAÇÃO DA LIGA DE TITÂNIO Ti6Al4V COM MÍNIMAS QUANTIDADES DE
FLUIDO DE CORTE**

RODRIGO PANOSSO ZEILMANN

ESTA TESE FOI JULGADA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Orientador

Prof. Dr.-Ing. Fritz Klocke
Co-orientador

Prof. Dr. José Antônio Bellini da Cunha Neto
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Presidente

Prof. Álisson Rocha Machado,
Ph.D.
Relator

Prof. Carlos Alberto Costa, Ph.D.
Ahrens

Prof. Dr. Eng. Carlos Henrique

Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter

Para **Solange** e meus pais **Adalberto** e **Nelci**

AGRADECIMENTOS

A minha esposa **Solange** pela demonstração de amor, apoio e compreensão nesta jornada que atravessou fronteiras.

Aos meus queridos pais **Adalberto** e **Nelci**, pelo exemplo familiar e amor sem limites.

Ao **Professor Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner**, pela orientação deste trabalho, pela demonstração de profissionalismo, pela amizade e pelo apoio durante estes anos todos de trabalho.

Ao **Professor Dr.-Ing. Fritz Klocke**, pela co-orientação e disponibilização da infraestrutura do WZL.

Ao **Professor Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter**, pela amizade e pelo apoio durante estes anos de trabalho.

Ao **CNPq / CAPES / DAAD**, pela concessão do financiamento das bolsas de estudo no Brasil e na Alemanha.

Aos amigos e colegas **Eng. Cleyzer Marcondes Bastos**, **Eng. Eduardo Weingärtner** e **Eng. Ivo Mamoru Tatibana** pelo apoio, pela dedicação intensa e pela contribuição a realização deste trabalho.

Aos amigos e colegas **Dipl.-Ing. Rainer Fritsch**, **Dr.-Ing. Klaus Gerschwiler**, **Dipl.-Ing. Stefan Hoppe**, **Dipl.-Ing. Kai Risse**, **Helmut Carl**, **Sascha Kamms**, **Johannes Thomas**, **Brigitte Niederbach** e **Dagmar Thines**, pelo apoio e contribuição a realização deste trabalho.

Aos amigos de tantas alegrias em terras desconhecidas, **Marcos Alexandrino**, **Márcio Gomes**, **Lázaro Eleutério**, **Rubens Marimbondo**, **Naoto** e **Lari**, pela amizade e apoio em todas as horas.

A **Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC** e ao **Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP**, pela disposição de sua infra-estrutura.

A **Universidade Técnica de Aachen – RWTH** e ao Laboratório de Máquinas Ferramentas – **WZL**, pela disposição de sua infra-estrutura.

Às empresas **EADS Airbus GmbH, MTU München GmbH, Rolls-Royce AeroEngines GmbH, Kennametal Hertel AG, Sandvik GmbH, Seco Tools GmbH, Iscar Hartmetall GmbH**, pelo apoio intelectual e material indispensável à realização desta pesquisa.

Aos colegas do **LMP** e **WZL** que de alguma forma ajudaram neste trabalho.

A todos que de uma forma me ajudaram nesta jornada o meu sincero agradecimento.

CURRICULUM VITAE DO AUTOR

Nome:	Rodrigo Panosso ZEILMANN
Data/Local nascimento:	20 de outubro de 1972, Iraí/RS
Formação Acadêmica	
out. 1999 – mar. 2003	Doutorado Sanduíche Brasil – Alemanha UFSC, Florianópolis/SC – RWTH Aachen, Aachen Bolsista DAAD (<i>Deutscher Akademischer Austauschdienst</i>)
mar. 1995 – out. 1997	Mestrado no LMP, da UFSC, em Florianópolis/SC
mar. 1990 – dez. 1994	Engenharia Mecânica na Universidade de Passo Fundo UPF, em Passo Fundo/RS
1979 - 1989	Escolas de Primeiro e Segundo Grau, em Iraí/RS
Formação Profissional	
desde ago. 2002	Professor Concursado da Universidade de Caxias do Sul UCS, em Caxias do Sul/RS
desde nov. 2002	Coordenador do projeto “Usinagem a altas velocidades de corte” em desenvolvimento na UCS
abr. 2000 – mar. 2002	Assistente no WZL, da Universidade Técnica de Aachen RWTH, na Alemanha. Programa DAAD
out. 1997 - set. 1999	Pesquisador e Engenheiro Chefe do Laboratório de Mecânica de Precisão LMP da UFSC
mar. 1995 - out. 1997	Mestrando e Pesquisador do Laboratório de Mecânica de Precisão LMP da Universidade Federal de Santa Catarina UFSC
out. 1993 - jan. 1995	Estagiário na Firma Semeato Ind. e Com., em Passo Fundo/RS
jan. 1993 – out. 1993	Estagiário na Firma Refrigerantes Bernardon PEPSICO, em Passo Fundo/RS.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO	1
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 Ligas de Titânio	5
2.2 Usinagem de Ligas de Titânio	8
2.3 Fatores Motivadores para a Usinagem com Mínima Quantidade de Fluido Lubri-refrigerante (MQF)	11
2.3.1 Os aspectos ecológicos	11
2.3.2 Os aspectos econômicos	12
2.3.3 Os aspectos referentes à saúde	13
2.4 Particularidades do Processo de Furação	15
2.4.1 Grandezas de entrada e saída do processo de furação	16
2.4.2 Materiais para brocas	17
2.4.3 Geometria da broca	18
2.4.4 Esforços de usinagem na furação	18
2.4.5 Desgaste em brocas helicoidais	20
2.5 Furação com Mínima Quantidade de Fluido Lubri-Refrigerante (MQF)	23

	7
3 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS DO TRABALHO	28
3.1 Justificativa do Trabalho	28
3.2 Objetivos do Trabalho	34
3.2.1 Objetivo principal	34
3.2.2 Objetivos específicos	35
4 METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	36
4.1 Metodologia	36
4.2 Grandezas Medidas	36
4.3 Caracterização do Material	37
4.4 Ferramentas	39
4.5 Condições de Usinagem	46
4.6 Máquinas e Equipamentos	49
5 GRANDEZAS TECNOLÓGICAS INFLUENTES SOBRE O PROCESSO DE FURAÇÃO DA LIGA Ti6Al4V COM MINIMIZAÇÃO DE FLUIDO LUBRI-REFRIGERANTE	51
5.1 Fundamentos Tecnológicos	51
5.1.1 Conceitos e funções dos fluidos lubri-refrigerantes	51
5.1.2 Conceito e classificação dos sistemas de aplicação de MQF	56
5.2 Grandezas Mecânicas Influentes sobre o Processo	60
5.2.1 Efeitos sobre a ferramenta de corte	61
a) Desgaste e vida da ferramenta	61
b) Esforços mecânicos	77
c) Cavaco	95
5.2.2 Efeitos sobre a peça	99
a) Efeitos sobre a integridade da superfície usinada	100

	8
b) Efeitos sobre a forma do furo	113
5.3 Solicitações Térmicas sobre a Ferramenta e a Peça	125
5.3.1 Determinação da temperatura na ferramenta	126
5.3.2 Determinação da temperatura na peça	138
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS	149
6.1 Conclusões	149
6.2 Sugestões para Novos Trabalhos	152
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
ANEXO I	165
Máquinas e Equipamentos Empregados nos Experimentos	165
ANEXO II	169
Calibração do Sistema de Telemetria	169
Calibração do Sistema de Medição de Temperatura na Peça	169

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Corte de uma turbina aeronáutica	7
Figura 2.2	Componente de uma turbina aeronáutica fabricada com a liga de titânio Ti6Al4V	8
Figura 2.3	Fatores de motivação para a usinagem a seco [37]	11
Figura 2.4	Quantidade de óleo consumida na Alemanha em 1999 [38]	12
Figura 2.5	Exemplos de custos de fluidos lubri-refrigerantes na indústria automobilística [39]	13
Figura 2.6	Leis e normas para a utilização de fluido lubri-refrigerantes adotadas na Alemanha [37]	14
Figura 2.7	Variações do processo de furação	15
Figura 2.8	Grandezas de entrada e saída do processo de furação	16
Figura 2.9	Broca helicoidal de 3 gumes recomendada para a furação de Ti6Al4V	18
Figura 2.10	Componentes dos esforços na furação [4]	19
Figura 2.11	Principais desgastes apresentados em brocas [45]	21
Figura 2.12	Distribuição de calor na usinagem de um aço carbono [4]	23
Figura 2.13	Broca modificada para a furação de alumínio com MQF aplicado pelo interior da ferramenta [7]	26
Figura 2.14	Modificação do furo interno de refrigeração da broca [46]	27
Figura 3.1	Região de entrada e meio da superfície de um furo obtido na furação a seco de Ti6Al4V	31
Figura 3.2	Broca utilizada na furação a seco com um canal obstruído pelos cavacos	32
Figura 4.1	Diagrama dos ensaios e pontos investigados	60
Figura 4.2	Estrutura da liga Ti6Al4V utilizada nos ensaios	39

Figura 4.3	Broca com furos internos para refrigeração e três gumes (tipo 125)	41
Figura 4.4	Broca sem furos internos para refrigeração e três gumes (tipo 105)	42
Figura 4.5	Broca com furos internos para refrigeração e dois gumes (tipo 411)	43
Figura 4.6	Alargador testado com MQF aplicado através de furos previstos na ferramenta	44
Figura 4.7	Fresa e estratégia para o fresamento circular com MQF aplicado por bicos externos	46
Figura 5.1	Classificação dos fluidos lubri-refrigerantes de acordo com a norma DIN 51385	51
Figura 5.2	Carência das funções primárias para a usinagem a seco [57]	52
Figura 5.3	Típico cavaco obtido para a aplicação de MQF com bicos externos e a seco	54
Figura 5.4	Região na entrada e no meio do furo obtido com MQF aplicado por bicos externos	54
Figura 5.5	Broca para a furação, para MQF aplicado pelo interior da ferramenta	56
Figura 5.6	Sistemas de atomização de óleo para MQF aplicado pelo interior da ferramenta	57
Figura 5.7	Sistema para aplicação de MQF pelo interior da ferramenta, através da entrada do meio aerosol entre o eixo-árvore e o mandril [37]	58
Figura 5.8	Bico de mistura para aplicação de MQF externamente [37]	59
Figura 5.9	Recomendação para o posicionamento do bico externo à broca [58]	60
Figura 5.10	Vistas da broca ensaiada mostrando o lascamento da quina	62
Figura 5.11	Comportamento da vida da ferramenta para diferentes condições de aplicação de fluido lubri-refrigerante	64
Figura 5.12	Detalhes da aderência em ferramentas de metal-duro K10, sem e com revestimento de TiAlN, observada nos ensaios com MQF aplicado por bicos externos	66
Figura 5.13	Vida da broca para diferentes revestimentos, com MQF aplicado com	67

bicos externos

Figura 5.14	Desgaste da broca para diferentes condições de aplicação de fluido	68
Figura 5.15	Desgaste da broca revestida para diferentes formas de aplicação de fluido e para a furação a seco	69
Figura 5.16	Broca de cabeça inter-cambiável com aplicação de emulsão por bicos externos	70
Figura 5.17	Vista parcial da quina da broca e do cavaco obtido para as diferentes formas de aplicação de MQF, pelo interior e com bicos externos à ferramenta	71
Figura 5.18	Detalhe da guia com largura reduzida	72
Figura 5.19	Lubrificação hidrodinâmica na interface guia / parede do furo	72
Figura 5.20	Detalhe das modificações das brocas do tipo 284 e 25, empregadas com MQF aplicado pelo interior da ferramenta	73
Figura 5.21	Brocas do tipo 284, modificada e padrão, após os ensaios com MQF aplicado pelo interior da ferramenta	74
Figura 5.22	Comportamento da vida da broca do tipo 125 na furação para diferentes condições de aplicação de fluido lubri-refrigerante	75
Figura 5.23	Detalhe dos lascamentos típicos obtidos no gume transversal da broca na furação utilizando a metodologia do avanço intermitente	76
Figura 5.24	Comportamento da força de avanço F_f e do momento torçor M_t para a condição de emulsão aplicada pelo interior da ferramenta	78
Figura 5.25	Comportamento da força de avanço F_f e do momento torçor M_t para a condição de MQF aplicado com bicos externos	78
Figura 5.26	Gráfico de resistência mecânica da liga de titânio Ti6Al4V e da liga de níquel Inconel 718 em função da variação da temperatura	79
Figura 5.27	Comportamento da força de avanço F_f e do momento torçor M_t para a condição de MQF aplicado pelo interior da ferramenta	79
Figura 5.28	Força de avanço e momento torçor em função da velocidade de corte	80
Figura 5.29	Força de avanço e momento torçor em função do avanço	81

Figura 5.30	Comportamento da força de avanço F_f e do momento torçor M_t para aplicação de MQF pelo interior da broca, com maiores taxas de profundidade	81
Figura 5.31	Comportamento da força de avanço F_f e do momento torçor M_t para diferentes condições de aplicação de fluido lubri-refrigerante	82
Figura 5.32	Comportamento da força de avanço F_f e do momento torçor M_t para a furação com uma broca do tipo 105 com diferentes revestimentos	83
Figura 5.33	Sistemática dos ensaios de esforços	85
Figura 5.34	Influência do atrito das guias sobre o momento torçor M_t	86
Figura 5.35	Influência da ponta da broca sobre a força de avanço	87
Figura 5.36	Deformação plástica obtida no corpo de prova do ensaio do tipo 5	88
Figura 5.37	Influência da concepção de broca empregada sobre a força de avanço e sobre o momento torçor, na região central de uma broca de 2 gumes (tipo 411) e uma de 3 gumes (tipo 105)	89
Figura 5.38	Esquemática do torneamento ortogonal com uma broca de 2 gumes	91
Figura 5.39	Dimensões dos tubos utilizados nos ensaios e detalhe do tubo C após o ensaio	92
Figura 5.40	Regiões de análise na broca de 2 gumes	92
Figura 5.41	Posicionamento do par tubo / broca	93
Figura 5.42	Decomposição das força na furação	94
Figura 5.43	Detalhe dos cavacos formados na furação com MQF aplicado por bicos externos e a seco para as profundidades de 10 e 18 mm	96
Figura 5.44	Detalhe do cavaco obtido no processo com MQF aplicado por bicos externos com avanço normal e com avanço intermitente, para uma velocidade de corte de 30 m/min	97
Figura 5.45	Cavacos obtidos no processo de MQF aplicado pelo interior da ferramenta, para as velocidades de corte de 10, 30 e 40 m/min; com avanço contínuo e com avanço intermitente, para uma velocidade de corte de 30 m/min	98

Figura 5.46	Cavacos obtidos na furação com emulsão aplicada pelo interior da ferramenta para a velocidade de corte de 40 m/min, com 30 e 70 bar de pressão do fluido lubri-refrigerante	99
Figura 5.47	Rugosidade R_z para diferentes tipos de aplicação de fluido lubri-refrigerante	101
Figura 5.48	Rugosidade como função da velocidades de corte, para as condições de MQF aplicado pelo interior da ferramenta e com bicos externos	102
Figura 5.49	Comportamento da rugosidade em relação à evolução do número de furos para MQF aplicado internamente, com a broca do tipo 25	103
Figura 5.50	Comportamento da rugosidade R_a da superfície de furos usinados com brocas do tipo 105 sem e com diferentes revestimentos (TiAlN, TiCN e CrCN)	104
Figura 5.51	Rugosidade do primeiro, décimo e último furo para a ferramenta do tipo 105	105
Figura 5.52	Rugosidade obtida para o alargamento com MQF aplicado pelo interior da ferramenta	106
Figura 5.53	Detalhes da superfície do furo realizado com MQF aplicado por bicos externos	108
Figura 5.54	Detalhes da deformação plástica na furação com MQF aplicado por bicos externos em amostras de Ti6Al4V furadas com brocas helicoidais	108
Figura 5.55	Detalhes da deformação plástica no fresamento com MQF aplicado por bicos externos em amostras de Ti6Al4V furados com uma fresa de topo	109
Figura 5.56	Micro-dureza HV0.01 e HV0.03 na camada sub-superficial fresada com aplicação de MQF por bicos externos em amostras de Ti6Al4V furados com uma fresa de topo	109
Figura 5.57	Detalhes da superfície usinada e das deformações plásticas do furo realizado com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta em amostras de Ti6Al4V furados com uma broca helicoidal do tipo 25	110
Figura 5.58	Micro-dureza da superfície de uma amostra tirada da parede de um furo realizado com MQF aplicado pelo interior da broca	111

- Figura 5.59 Detalhes da superfície usinada e das deformações plásticas para uma amostra de material retirado da parede do furo alargado com MQF aplicado pelo interior da ferramenta 111
- Figura 5.60 Micro-trinca em uma amostra da parede de um furo realizado com uma broca helicoidal do tipo 125, com emulsão aplicada em abundância pelo interior da ferramenta para uma velocidade de corte de 50 m/min 113
- Figura 5.61 Evolução do diâmetro nominal para ensaios com emulsão aplicada pelo interior da ferramenta 114
- Figura 5.62 Diâmetro nominal do furo em função do revestimento da broca do tipo 105, na furação com MQF aplicado por bicos externos 115
- Figura 5.63 Evolução do diâmetro nominal na usinagem com MQF aplicado pelo interior da ferramenta com a broca do tipo 25 modificada 116
- Figura 5.64 Traçado de circularidade tipicamente registrada na furação com MQF aplicado por bicos externos com uma ferramenta do tipo 105 117
- Figura 5.65 Interpretação gráfica do material aderido na superfície de um furo realizado sob aplicação de MQF por bicos externos 118
- Figura 5.66 Erro de circularidade do furo obtido com uma broca do tipo 105 sem e com diferentes revestimentos e com MQF aplicado por bicos externos 119
- Figura 5.67 Diâmetro nominal do furo para três diferentes níveis de profundidade na furação com MQF aplicado por bicos externos com uma broca do tipo 105 120
- Figura 5.68 Cilindricidade medida no segundo furo para uma velocidade de corte $v_c = 30$ m/min com MQF aplicado por bicos externos à ferramenta do tipo 105 120
- Figura 5.69 Cilindricidade para o décimo furo da broca do tipo 105 sob aplicação do MQF por bicos externos, para as velocidades de corte de 15 e 30 m/min 121
- Figura 5.70 Circularidade tipicamente obtida na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta 122
- Figura 5.71 Cilindricidade para a furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta do tipo 25 122

Figura 5.72	Circularidade obtida em um furo alargado com MQF aplicado pelo interior da ferramenta de alargar	123
Figura 5.73	Circularidade obtida para o fresamento circular periférico com aplicação de MQF por bicos externos	124
Figura 5.74	Principais componentes do sistema de telemetria desenvolvido para a medição da temperatura na broca em rotação	127
Figura 5.75	Sistema de telemetria em processo, com posicionamento da antena receptora e dos bicos externos de atomização do sistema MQF	128
Figura 5.76	Máxima temperatura alcançada na proximidade do gume cortante para brocas do tipo 125	130
Figura 5.77	Vida da broca para três condições de aplicação de fluido lubrificante, com uma broca classe K10 revestida com TiN, para uma velocidade de corte de 30 m/min e um avanço de 0,10 mm	131
Figura 5.78	Comportamento da temperatura medida no gume da broca	132
Figura 5.79	Temperatura na broca como função da velocidade de corte, para MQF aplicado por bicos externos	133
Figura 5.80	Máxima temperatura na broca para um aumento do avanço, de 0,10 para 0,16 mm, para MQF aplicado por bicos externos	134
Figura 5.81	Máxima temperatura na broca x velocidade de corte, na furação a seco	134
Figura 5.82	Sobreposição das curvas de comportamento de temperatura para MQF aplicado por bicos externos e a seco, ao longo do aumento da velocidade de corte	135
Figura 5.83	Temperatura para diferentes conceitos de broca	136
Figura 5.84	Máxima temperatura na broca para a ferramenta do tipo 284 com 2 gumes, como função da velocidade de corte	137
Figura 5.85	Temperatura na furação a seco dos aços Ck45K e 9SMn28, com a broca fixa [46]	137
Figura 5.86	Representação esquemática e corte de um corpo de prova para a medição da temperatura na peça e o posicionamento da broca para a medição	138

Figura 5.87	Temperatura máxima na peça para diferentes condições de aplicação de fluido lubri-refrigerante	140
Figura 5.88	Comportamento da evolução da temperatura obtida na peça, na furação com emulsão abundante aplicada pelo interior da ferramenta	141
Figura 5.89	Máxima temperatura registrada na peça para ferramenta não revestida e para diferentes revestimentos, como função da velocidade de corte	142
Figura 5.90	Temperatura máxima na peça para os 3 termo-elementos em diferentes profundidades, com 30 m/min e MQF aplicado por bicos externos	143
Figura 5.91	Comportamento da evolução da temperatura na peça para a broca revestida com TiAlN	145
Figura 5.92	Comportamento da temperatura medida na peça, na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta	146
Figura 5.93	Relação entre máxima temperatura x esforços mecânicos, para a aplicação de MQF pelo interior da ferramenta	147
Figura 5.94	Comportamento da temperatura na peça para a furação a seco	147
Figura 8.1	Centro de Usinagem Vertical Chiron FZ 15 S [54]	166
Figura 8.2	Equipamento para aplicação de MQF por bicos externos	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Recomendações de velocidade de corte e avanço para a furação de titânio com brocas de HSS e metal-duro [4]	10
Tabela 2.2	Principais classes de metal-duro utilizadas na furação [43]	17
Tabela 4.1	Propriedades mecânicas e físicas da liga Ti6Al4V, em comparação com a liga de aço SAE 1045 [4]	38
Tabela 4.2	Principais brocas utilizadas nos ensaios	40
Tabela 4.3	Parâmetros de corte para a furação	47
Tabela 4.4	Parâmetros de corte para o alargamento	48
Tabela 4.5	Parâmetros de corte para o fresamento	48

LISTA DE ABREVIATURAS

B105	Broca de 3 gumes sem canal interno de refrigeração
B125	Broca de 3 gumes com canal interno de refrigeração
B411	Broca de 2 gumes com canal interno de refrigeração
CAPES	Conselho de Apoio a Pesquisa
CCD	<i>Charged Coupled Device</i> (Dispositivo de Acoplamento de Carga)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CrCN	Carbonitreto de cromo
DAAD	<i>Deutsche Akademische Austausch Dienst</i> (Serviço de Intercâmbio Acadêmico Alemão)
DIN	<i>Deutsche Industrie Normalisierung</i> (Normalização da Indústria Alemã)
G0	Linguagem de máquina – avanço rápido
G1	Linguagem de máquina – avanço programável
HB	Dureza Brinell
HRC	Dureza Rockwell
HSS	<i>High-speed-steel</i> (aço-rápido)
HV	Dureza Vickers
K	Tipo de termo-elemento
K	Classe de metal-duro
KSS	<i>Kühlschmierstoff</i> (fluido de corte lubri-refrigerante)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MKS	<i>Minimalmengen Kühlschmierungssystem</i> (Sistema de Mínima Quantidade de Fluido de Corte)
MMKS	<i>Minimalmengen Kühlschmierung</i> (Mínima Quantidade de Fluido de Corte)
MMS	<i>Minimalmengenschmierung</i> (Mínima Quantidade de Fluido de Corte)

MQF	Mínima Quantidade de Fluido de Corte
RWTH	<i>Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule</i> (Universidade Técnica de Aachen)
SAE	<i>Society American Engineering</i> (Sociedade Americana de Engenheiros)
TiAlN	Nitreto de titânio alumínio
TiCN	Carbonitreto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
WZL	<i>Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre</i> (Laboratório de Máquinas-Ferramentas e Sistemas)

LISTA DE SÍMBOLOS

x		Média aritmética
a_p	mm	Profundidade de corte
C_m	mm	Desgaste da guia transversal (largura)
C_t	mm	Desgaste da guia transversal (altura)
d	mm	Diâmetro da ferramenta (broca)
D	mm	Diâmetro do furo gerado pela broca
f	mm	Avanço de corte
f_z	mm	Avanço de corte por gume
F_c	N	Força de corte
F_f	N	Força de avanço
F_p	N	Força passiva
l	mm	Comprimento
l/d		Relação profundidade diâmetro do furo
M_t	N.m	Momento torçor
M_w	mm	Desgaste da quina
P	bar	Pressão
Q	ml/h	Vazão
R_a	μm	Rugosidade média aritmética
R_m	N/mm^2	Resistência à tração
R_{max}	μm	Rugosidade máxima
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Limite elástico
R_z	μm	Rugosidade média
t	s	Tempo
T	grau	Temperatura

T_b	grau	Temperatura na broca
T_p	grau	Temperatura na peça
$T_p \text{ max}$	grau	Temperatura máxima na peça
v_c	mm	Velocidade de corte
VB_{MED}	mm	Desgaste de flanco médio
VB_{MAX}	mm	Desgaste de flanco máximo
W	mm	Desgaste de quina
λ	W/mK	Condutividade térmica
ρ	Kg/m ³	Densidade
δ	μm	Raio do gume
σ		Desvio médio aritmético
Z		Número de gumes

RESUMO

Este trabalho, desenvolvido como tema de uma tese de doutorado sanduíche, no escopo da parceria do Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP da UFSC, com o Laboratório de Máquinas Ferramentas - WZL da RWTH Aachen, apresenta um estudo das características de comportamento para o processo de usinagem da liga de titânio Ti6Al4V sob a condição de aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte - MQF. Para avaliar o efeito da lubrificação obtido com MQF foi escolhido o processo de furação, onde o fluido de corte foi aplicado por bicos externos e pelo interior da broca de metal-duro. Com o apoio dos fabricantes de ferramentas de corte foram efetuadas modificações na geometria das ferramentas, objetivando uma redução da quantidade de calor gerado na formação do cavaco, contribuindo para o sucesso da furação com MQF. Os resultados mostram um bom potencial na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta. Os cavacos e a qualidade do furo são obtidos com características próximas às obtidas com a aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta. Na furação com MQF aplicado com bicos externos à broca, o processo fica restrito a pequenas profundidades e limitado com referência aos requisitos da qualidade do furo. A forte tendência de caldeamento de material da peça no gume da ferramenta de corte e na parede do furo apresentou-se também como fator crítico. No alargamento com ferramentas de gume único, onde a lubrificação das sapatas é de sobremodo crítica a aplicação de MQF levou a resultados satisfatórios, tanto com relação à qualidade da superfície usinada, como também a circularidade e cilindridade dos furos. Para o fresamento circular de uma cavidade com MQF mostrou-se que não ocorre o empastamento da ferramenta, mas a qualidade da parede da cavidade deixou a desejar. Mostrou-se que, de uma forma geral, o efeito de lubrificação é satisfatoriamente obtido com MQF. Quando o calor gerado no processo é predominantemente decorrente da deformação plástica na raiz do cavaco, o resultado apenas com MQF não é satisfatório, mas com a adequação da geometria de corte da ferramenta obtêm-se resultados que se aproximam aos obtidos com grandes quantidades de fluido de corte.

ABSTRACT

This work, developed as subject of a thesis of doctor sandwich program, within the partnership between the Laboratory of Mechanics of Precision - LMP of the UFSC, and the Laboratory of Machines Tools - WZL of the RWTH Aachen, presents a study of the behavior characteristics for the titanium alloy Ti6Al4V machining process under the condition of application of Minimal Quantity of Lubricant - MQL. Drilling process was chosen to evaluate the effect of the lubrication gotten with MQL the, where the cut fluid was applied for external nozzle and internally of the drill. With the support of the manufacturers of cut tools modifications in the geometry of the tools had been effected, aiming a reduction of the amount of heat generated in the formation of the chip, contributing for the success of the drilling with MQL. The results show a good potential in the drilling with MQL applied for the internally of the tool. The chips and the quality of the holes are gotten with characteristics next to the gotten ones with the emulsion application for the internally of the tool. In the drilling with MQL applied with external nozzle to the drill, the process is restricted to the small depths and limited with reference to the requirements of the quality of the hole. The strong trend of adhesion of material of the part in the edge and in the wall of the hole, was also presented as critical factor. In the reamers with tools of only edge, where the lubrication of the blades is critical, the MQL application took the satisfactory results, as much with relation to the quality of the machined surface, as also the circularity and cylindricity of the holes. In the circular milling of a cavity with MQL revealed that the adhesions on the tool does not occur, but the quality of the wall of cavity left to desire. One revealed that, of a general form, the lubrication effect satisfactorily is gotten with MQL. When the heat generated in the process is dominant decurrent of the plastic deformation in the root of the chip, the result only with MQL is not satisfactory, but with the adequacy of the geometry of cut of the tool they are gotten resulted that they are come close to the gotten ones with great amounts of cut fluid.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O homem utiliza fluidos lubrificantes há muitos anos. Os antigos egípcios empregavam óleos para facilitar o deslizamento entre corpos de grande tamanho e massa. O óleo derramado manualmente propiciava a formação de uma película lubrificante entre as partes em movimento, requerendo menores esforços para o deslocamento de blocos de construção ou elementos para locomoção [1].

Já no século XIX, a Revolução Industrial desencadeou um aumento da fabricação de produtos e bens de consumo fabricados em massa, sendo que um dos fatores motivadores para esta aceleração e expansão da indústria foi o crescimento da população. Em decorrência da ampliação fabril, houve maior necessidade do uso de produtos como os óleos e as graxas por parte das empresas de manufatura, aumentando também os problemas correlacionados com seu uso e seu descarte. A indústria de transformação metal mecânica é detentora de uma grande fatia deste uso de óleos e graxas.

Não tão longe da Revolução Industrial, a utilização de fluidos lubri-refrigerantes na usinagem foi baseada originalmente no aumento da vida das ferramentas de corte, como consequência de uma lubrificação da interface ferramenta – peça – cavaco e da região em torno da raiz do cavaco no processo de usinagem [2 - 5]. NORTHCOTT [4] foi provavelmente o primeiro pesquisador a escrever sobre o significativo aumento na produtividade causada pelo uso de fluidos lubri-refrigerantes no corte de materiais, há mais de 140 anos. TAYLOR [4] mediu em 1894 a influência do fluido lubri-refrigerante sobre o processo de usinagem. Sua verificação se fez jorrando uma grande quantidade de água na região peça - ferramenta - cavaco, que permitiu aumentar a velocidade de corte de 30 a 40% sem prejuízo para a vida da ferramenta de corte [4]. Estes princípios permaneceram por muito tempo como verdadeiros para todos os casos, sem que houvesse um questionamento dos efeitos e consequências dos fluidos lubri-refrigerante.

A partir da década de 1970, uma legislação mais severa no controle dos produtos utilizados nos fluidos de usinagem foi estabelecida pelas autoridades sindicais e

ambientais. Estes produtos, para manter sua estabilidade, contêm em sua composição vários elementos como aditivos, produtos de reações, fungicidas e bactericidas, que indiretamente são causadores de doenças ao homem. O descarte inadequado destes fluidos de corte é extremamente prejudicial ao meio ambiente. Os fluidos lubri-refrigerantes devem ser separados e tratados adequadamente. No entanto, uma parcela dos fluidos é eliminada na região de trabalho por emissões e evaporação, pelo arrastamento efetuado pelas peças e cavacos, e também com a água utilizada para a limpeza do chão fabril. Por estas razões, corre-se o risco da poluição dos solos, da água e do ar [5, 6].

Com a exigência de se reduzir os problemas causados direta ou indiretamente pelo uso do fluido lubri-refrigerante, surgiu o conceito de minimização da quantidade de fluido lubri-refrigerante, também chamado de MQF (Mínima Quantidade de Fluido). A literatura cita termos como usinagem ecológica e também a usinagem a seco. A usinagem a seco é aquela em que o fluido líquido está totalmente ausente. No entanto, como na usinagem com MQF, a peça e a máquina-ferramenta permanecem secas, esta também é citada pela literatura como usinagem a seco.

Atualmente, a usinagem com MQF e a seco estão dentre os temas de maior estudo na área de usinagem. Os pesquisadores desta área estão sendo incentivados por vários fatores, dentre os quais os principais são listados abaixo:

- as empresas de manufatura usuárias de fluidos lubri-refrigerantes encontram-se sob pressão de leis ambientais, sindicais, ecologistas e dos órgãos governamentais;
- o surgimento de um novo mercado para a comercialização de máquinas, equipamentos e óleos especiais, voltados para a usinagem com MQF. Com isto, tem-se uma nova cadeia de empresas especializadas em projetar e fabricar tais equipamentos, bem como em prestar consultoria especializada;
- o surgimento de um mercado para a comercialização de ferramentas e dispositivos de usinagem especiais, voltados para a usinagem a seco e também para a usinagem com MQF. Com o surgimento deste mercado, ampliou-se o espectro de produtos das empresas especializadas em fabricar ferramentas de corte;

- os grandes institutos de pesquisa são incentivados pela ausência de informações disponíveis no mercado. Esta carência de informações tecnológicas possibilita o surgimento do pioneirismo no desenvolvimento de tecnologia voltada para a usinagem a seco e para a usinagem com MQF;

- todos os pontos citados anteriormente incentivam o desenvolvimento de novas linhas de pesquisa voltadas para a usinagem a seco e com MQF, e com isso novos projetos podem ser desenvolvidos. Estes projetos são financiados pelas empresas manufatureiras usuárias de fluidos lubri-refrigerantes e pelo governo, e apoiados também pelas empresas emergentes deste novo mercado. Assim, os pesquisadores encontram facilidades em aprovar os projetos, gerando maiores recursos financeiros.

Além disto, a usinagem ecológica também apresenta fatores econômicos atraentes para as indústrias usuárias dos fluidos lubri-refrigerantes, associados à redução de sua utilização. Esta economia pode ser direta, pela redução do custo do produto lubri-refrigerante, ou indireta, custo de tratamentos de efluentes, descarte, e custos referentes às questões trabalhistas, muitas vezes ligadas às precárias condições de trabalho ou referentes aos produtos químicos à qual o ser humano está exposto. Uma redução destes custos pode apresentar uma grande vantagem competitiva, necessária às empresas diante do atual sistema econômico globalizado [4 - 12].

No sentido de contribuir com a busca de soluções ecológica e economicamente corretas, este trabalho desenvolvido no Laboratório de Máquinas-Ferramentas - WZL da Universidade Técnica de Aachen - RWTH Aachen, na Alemanha, surgiu da necessidade inicial de um maior estudo e detalhamento das principais grandezas tecnológicas envolvidas na usinagem da liga de titânio Ti6Al4V sob condições de aplicação de mínimas quantidades de fluido lubri-refrigerante.

Dessa forma, a necessidade de um trabalho voltado para uma análise do processo de furação com aplicação de MQF é basicamente motivada por três fatores principais. O primeiro, oriundo da inviabilidade de obtenção de furos de boa qualidade através do processo de furação a seco, descrito na justificativa deste trabalho (item 3.1). Um segundo fator é motivado pelas vantagens econômicas e ecológicas da usinagem com redução da quantidade de fluidos lubri-refrigerantes. E um terceiro

fator, alavancado pelo grande interesse das empresas usuárias da liga de titânio Ti6Al4V, em saber quais são os reais limites e as dificuldades em se usinar este material sob condição de aplicação de MQF.

A infra-estrutura do WZL na área de fabricação, aliada ao *know-how* adquirido em usinagem com MQF, oriundo de trabalhos anteriores, possibilitou as condições e o apoio necessário para a realização dos experimentos e ensaios requeridos por este trabalho.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1 Ligas de Titânio

O titânio foi descoberto pelo pastor e metalurgista amador William GREGOR em 1791, em Manaccan, na Inglaterra, quando ele isolou o FeTiO_3 [13]. A partir de sua descoberta, o titânio foi caracterizado e classificado por pesquisadores da área de metalurgia. Devido às suas características particulares, o titânio encontrou um grande campo de aplicação em diversas áreas, como na indústria química, metalúrgica, aeroespacial, bélica, de processamento, médica e de próteses, equipamentos para esportes, entre outras [13 – 26].

As ligas de titânio podem ser divididas em 4 grupos principais: o titânio puro, a liga alfa (α), a liga beta (β) e a liga alfa + beta ($\alpha+\beta$). Nestas ligas as características se distinguem principalmente pela resistência mecânica, pela temperatura à que podem ser submetidas em trabalho, pela resistência à corrosão e pela densidade. Estas propriedades são diretamente influenciadas pelos elementos de liga, chamados de estabilizadores de fase, e pelo seu tratamento na fabricação [4]. Uma descrição das diferentes ligas é apresentada a seguir.

O titânio puro, ou comercialmente puro, apresenta uma transformação alotrópica a 882°C , mudando de uma fase α hexagonal compacta em baixas temperaturas para uma fase β cúbica de corpo centrado em elevadas temperaturas. Em termos de resistência mecânica, esta pode ser melhorada através da adição de oxigênio. A resistência à tração encontra-se em uma faixa que vai de 300 até 750 N/mm^2 [4, 20].

A liga alfa (α) tem uma micro-estrutura com fase- α , modificada pela adição de elementos estabilizadores desta fase, como o alumínio, o estanho e o zircônio. As ligas- α possuem excelentes propriedades de resistência mecânica e resistência à corrosão. Estas ligas são utilizadas em aplicações criogênicas, bem como para a

fabricação de componentes que trabalham a elevadas temperaturas. A resistência é de aproximadamente 800 N/mm^2 .

As ligas beta (β) contém elementos estabilizadores da fase- β , como o vanádio, o molibdênio, o manganês e o cromo. Estas ligas possuem excelente resistência à tração, da ordem de 1270 N/mm^2 .

A liga alfa + beta ($\alpha+\beta$) contém aditivos estabilizadores das fases α e β . Estas ligas podem ser tratadas termicamente para atingirem elevados níveis de resistência e possuem as melhores relações entre resistência / densidade. A resistência à tração obtida encontra-se entre 1000 e 1200 N/mm^2 . A liga mais típica deste grupo é a liga Ti6Al4V, que possui grande aplicabilidade na indústria aeroespacial, na fabricação de pás de compressores, rebites, parafusos, engrenagens, propulsores, rotores, contentores e carcaças de câmaras de combustão [4, 20, 27].

As ligas de titânio encontram uma grande fatia do seu mercado principalmente na indústria de componentes para turbinas aeronáutica. Os principais fatores que fazem com que o titânio possua uma ótima aceitação e utilização nesta área são:

- uma boa relação resistência / densidade;
- resistência à fratura;
- uma ótima resistência à corrosão; e
- boa resistência mecânica à elevadas temperaturas de trabalho [4, 13, 14, 17, 20, 26, 27].

A figura 2.1 apresenta um corte de uma turbina aeronáutica, onde vários componentes, como tampas de compressores e palhetas, são fabricados de ligas de titânio.

Dentre as diversas ligas, a que mais se destaca é a liga ($\alpha+\beta$) Ti6Al4V. Esta liga é responsável por mais de 45% de todas as aplicações de titânio em componentes e acessórios utilizados por empresas usuárias de ligas de titânio na atualidade [20]. A

liga Ti6Al4V apresenta uma estrutura composta de uma fase α , uma fase β , e de vários carbonetos e nitretos. A figura 2.2 - 1 mostra um componente (tampa de compressor de turbina) que é fabricado da liga de titânio Ti6Al4V e o detalhe de sua estrutura metalográfica (figura 2.2 - 2).

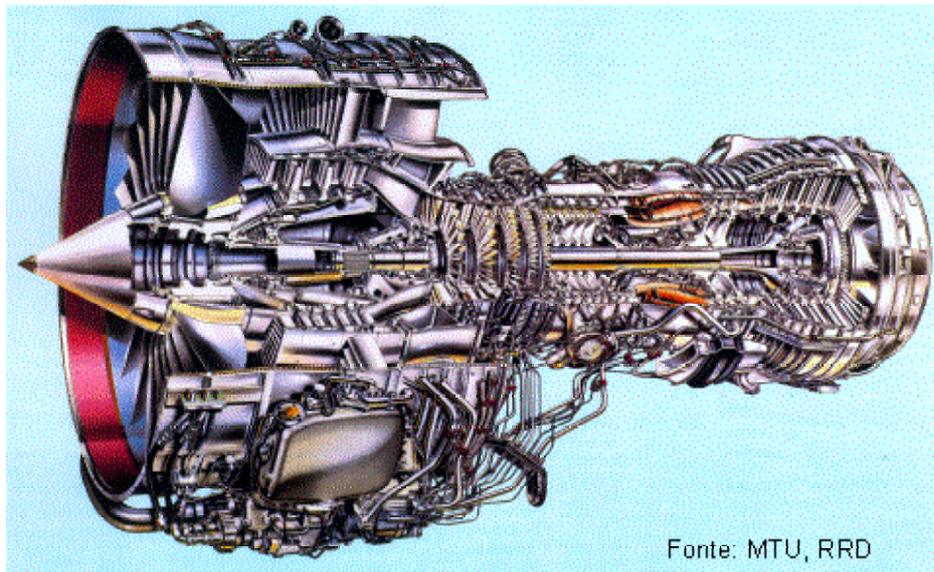


Figura 2. 1 – Corte de uma turbina aeronáutica

A associação das fases influenciadas pelos elementos constituintes desta liga faz com que esta estrutura apresente uma excelente combinação de elevada resistência mecânica e baixa densidade, sendo recomendada para trabalhos sob temperatura de até 300°C em tempos prolongados. Entretanto, estas boas características fazem com que haja uma perda no que se refere à usinabilidade, sendo classificada pela literatura e usuários como uma liga de baixa usinabilidade [4, 18, 20], comparada com a usinabilidade de outros metais.

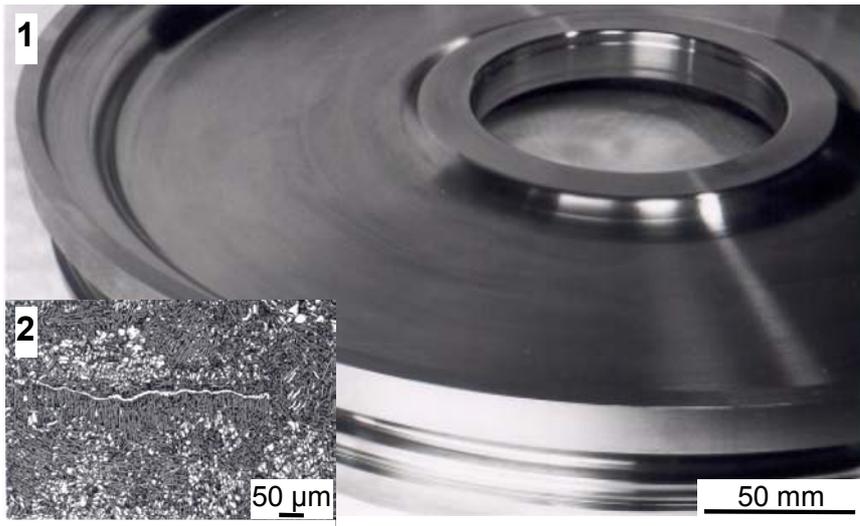


Figura 2. 2 – Componente de uma turbina aeronáutica fabricado da liga de titânio Ti6Al4V

2.2 Usinagem de Ligas de Titânio

A usinagem de ligas de titânio tem sido alvo de estudos de vários pesquisadores, alavancados principalmente pelo interesse da indústria aeronáutica e militar, que sofreu um grande impulso no período após a Segunda Guerra Mundial [13, 17, 20, 28]. A ênfase desses trabalhos apontava principalmente para novas aplicações de ligas de titânio e paralelamente a isto, para a obtenção de uma melhora da produtividade na fabricação de componentes empregando estas ligas. O enfoque de produtividade da manufatura recaiu principalmente sobre o comportamento e mecanismos de desgastes das ferramentas de corte. Entretanto, estas pesquisas não foram suficientes para a aplicação satisfatória de novos conceitos de ferramentas de corte, bem como para a usinagem destas ligas com MQF [20, 29].

Características como resistência a elevadas temperaturas, baixa condutividade térmica e alta reatividade química, reforçam a classificação de difícil usinabilidade imposta a estas ligas [4, 18, 20, 28 - 31].

Os mecanismos de desgaste mais observados na usinagem de titânio são os de difusão, abrasão, deformação plástica, lascamento e quebra [20, 30, 31 - 33]. Estes mecanismos podem ser explicados pelas elevadas temperaturas alcançadas du-

rante a usinagem nas regiões de contato peça / cavaco e peça / ferramenta, pelas altas pressões sobre a ferramenta durante a usinagem e pela forma lamelar do cavaco obtido durante o processo [20, 30 – 36].

As elevadas temperaturas alcançadas na interface ferramenta / material da peça são algumas das principais causas do rápido desgaste comumente observado na ferramenta que usina ligas de titânio. Para as baixas velocidades de corte com que o titânio é usinado, uma grande parte do calor gerado no corte, cerca de 80%, é conduzido para a ferramenta. O transporte de calor pelo cavaco lamelar ou para dentro da peça que apresenta uma baixa condutividade térmica é limitado a aproximadamente 20% [20, 32]. O titânio deve ser usinado com baixa velocidade de corte, pois este é o parâmetro de corte de maior influência sobre a temperatura da zona de contato. Isto vale tanto para cortes contínuos (torneamento, furação, rosqueamento por usinagem) quanto para cortes interrompidos (fresamento, brochamento e retificação) [4].

As altas temperaturas de corte sobre uma pequena área de contato entre a ferramenta e o material levam a uma solitação térmica extrema do material da ferramenta [33]. As temperaturas geradas são maiores do que as geradas quando na usinagem da liga de níquel Nimonic 105, e bem maiores do que na usinagem do aço Ck53N [34].

Os mecanismos de difusão levam a um enfraquecimento do material da ferramenta e fazem com que ocorra um desgaste abrasivo rápido da ferramenta, caracterizado por um acentuado desgaste de cratera [33]. Para uma redução do desgaste de cratera, procura-se usar artifícios como o emprego de materiais de ferramenta mais duros e inertes à reação química causada pela afinidade ao titânio [31, 32, 35].

Em conseqüência da elevada elasticidade, do encruamento e da baixa condutividade térmica do titânio, o tipo de cavacos é predominantemente lamelar. Em razão da descontinuidade dessa formação de cavaco as ferramentas são ciclicamente solicitadas mecânica e termicamente. Desta forma, o desgaste global da ferramenta é fortemente influenciado por mecanismos correlacionados com a fadiga da estrutura da ferramenta de corte.

Como materiais de corte para a usinagem de titânio são recomendadas as ferramentas de metal-duro do tipo K, baseadas em carbonetos de tungstênio e cobalto, assim como ferramentas de aço-rápido com elevados teores de cobalto [4].

2.3 Fatores Motivadores para a Usinagem com Mínima Quantidade de Fluido Lubri-Refrigerante (MQF)

Como os principais fatores para o emprego de usinagem a seco ou com minimização da quantidade de fluido lubri-refrigerante, podem ser citados os aspectos ecológicos, econômicos e o referentes à saúde, conforme mostra a figura 2.3.

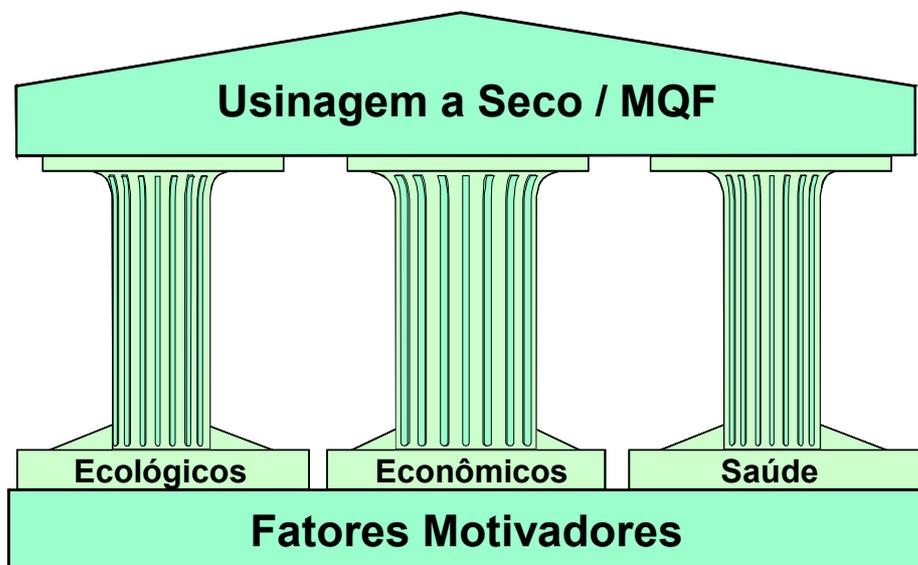


Figura 2. 3 – Fatores de motivação para a usinagem a seco [37]

2.3.1 Os aspectos ecológicos

O consumo de aproximadamente 1.159.922 toneladas de material lubrificante no ano de 1999 na Alemanha é mostrado na figura 2.4. De forma semelhante, nos outros países industrializados pode ser estabelecida uma relação direta entre a produção de bens de consumo e de capital, os veículos automotivos e o consumo de produtos lubrificantes.

Como estes óleos primariamente não são destruídos (por queima, por exemplo), eles devem ser descartados adequadamente no final de seu uso. Uma parcela significativa destes óleos lubrificantes é empregada na lubri-refrigeração de processos de usinagem, representando 75.000 toneladas no ano de 1999 na Alemanha. As 30.000 toneladas que são emulsionadas em água, representam a necessidade de um descarte anual de aproximadamente 1.000.000 de toneladas de emulsão [38].

Uma parte desta quantia é perdida através da evaporação do fluido, do arraste com peças e cavacos, sendo desta forma dada a possibilidade de ser desviada para os solos, para a água e para o ar.

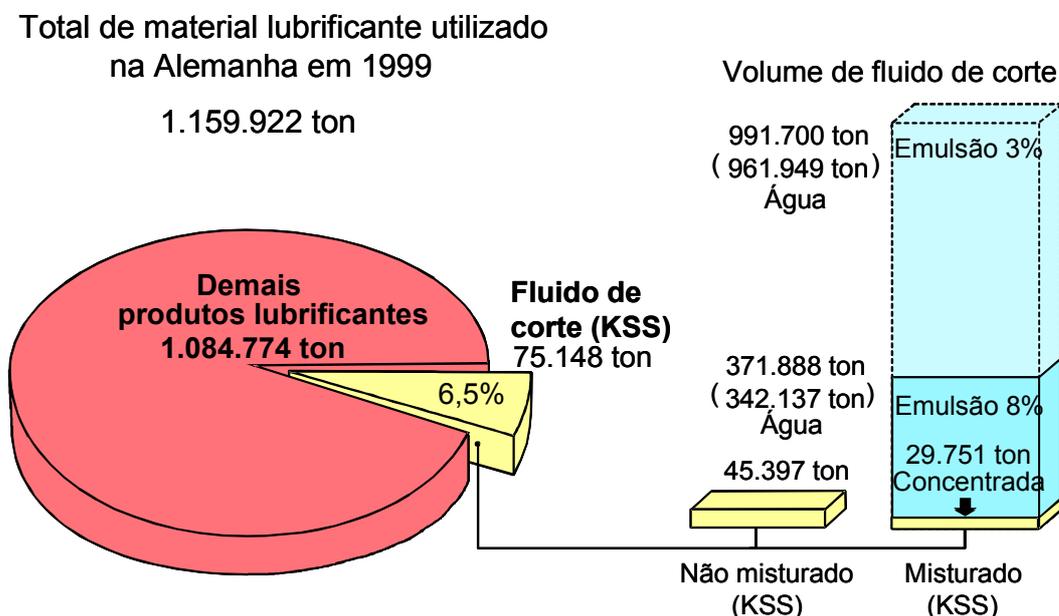


Figura 2. 4 – Quantidade de material lubrificante consumida na Alemanha em 1999

[38]

2.3.2 Os aspectos econômicos

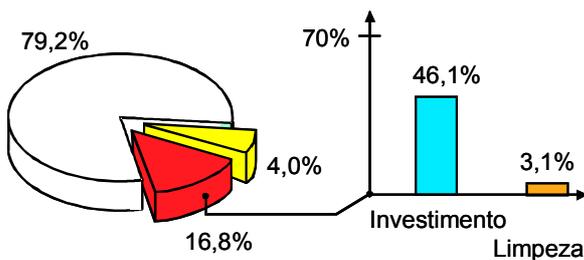
A quantidade de fluidos, citada anteriormente, está diretamente associada à da amplitude dos custos diretos e indiretos envolvidos no setor de usinagem. É importante salientar que os custos indiretos muitas vezes nem são calculados e às vezes até esquecidos pelas empresas. Custos indiretos são aqueles que estão relacionados com pessoal, a saúde, a segurança, a falta de trabalhadores ao trabalho por motivo

de doença causada pelo contato com fluidos lubri-refrigerantes, a previdência social, entre outros [7, 37].

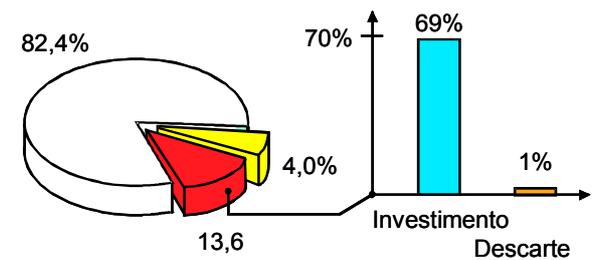
Hoje, na Alemanha, muitas empresas, especialmente grandes montadoras, conhecem exatamente os custos referentes à utilização de fluidos lubri-refrigerante e são as que mais investem na redução ou eliminação dos fluidos dos seus processos. Nas empresas de grande porte, os valores chegam a alcançar até 16,8% dos custos totais de produção. Para empresas de menor porte, estes custos são estimados na ordem de 1 a 6%. Estas diferenças são justificadas e dependentes do tipo de depósito, controle e tratamento que a empresa possui para o lubri-refrigerante e do tipo de sistema de abastecimento para as máquinas-ferramentas, isto é, com uma central de distribuição de fluido individual [4, 6 - 8].

Na figura 2.5 são mostrados três exemplos de custos de fluidos lubri-refrigerantes calculados na indústria automobilística. Os exemplos são dados levantados na usinagem de peças prismáticas complexas de alumínio (carcaça e cabeça de cilindro), que apresentam custos de fluidos lubri-refrigerantes entre 7,5% e 16,8%. Para estes três exemplos os custos referentes às ferramentas de corte estão situados na faixa entre 2,5% e 4%, isto é, um fator de 3 a 4 vezes menor.

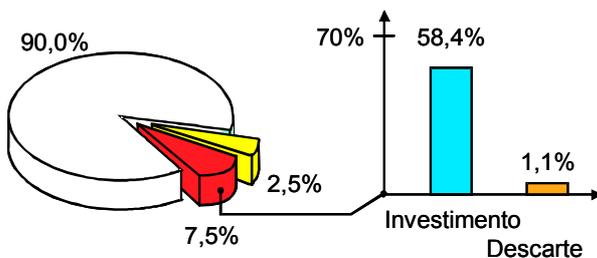
Exemplo 1 Peça de alumínio, Firma A



Exemplo 2 Peça de alumínio, Firma B



Exemplo 3 Peça de alumínio, Firma C



- Outros custos de fabricação
- Custos com lubri-refrigerantes
- Custos com ferramentas

Figura 2. 5 – Exemplos de custos de fluidos lubri-refrigerantes na indústria automobilística [39]

2.3.3 Os aspectos referentes à saúde

Os fluidos lubri-refrigerantes utilizados na usinagem podem possuir na sua constituição: aditivos, biocidas, bactericidas, fungicidas, produtos de reações, inibidores de corrosão, entre outros. Estes produtos, se descartados inadequadamente, podem causar a poluição do meio ambiente e ainda podem ser responsáveis por vários tipos de doenças constatadas em trabalhadores do chão fabril [7, 37].

Dentre as doenças mais apresentadas em trabalhadores, as doenças de pele são as mais comuns. Os efeitos nocivos estão sendo associados ao contato com o fluido lubri-refrigerante durante a jornada de trabalho. Este contato pode se dar de forma direta através do fluido, ou através dos vapores e névoas formados no processo de usinagem [6, 7, 37]. Em pesquisas realizadas em empresas metal-mecânica, doenças como alergias e problemas respiratórios também foram apontados como problemas causados pelos fluidos de usinagem [37].

Embasadas nos problemas encontrados nas áreas de trabalho dos operários, bem como nos riscos de saúde oriundos desta situação, foram criadas leis que restringem a utilização de alguns produtos perigosos na composição de fluidos lubri-refrigerantes. A figura 2.6 apresenta algumas das principais leis e normas para a utilização de fluidos lubri-refrigerantes adotadas na Alemanha.

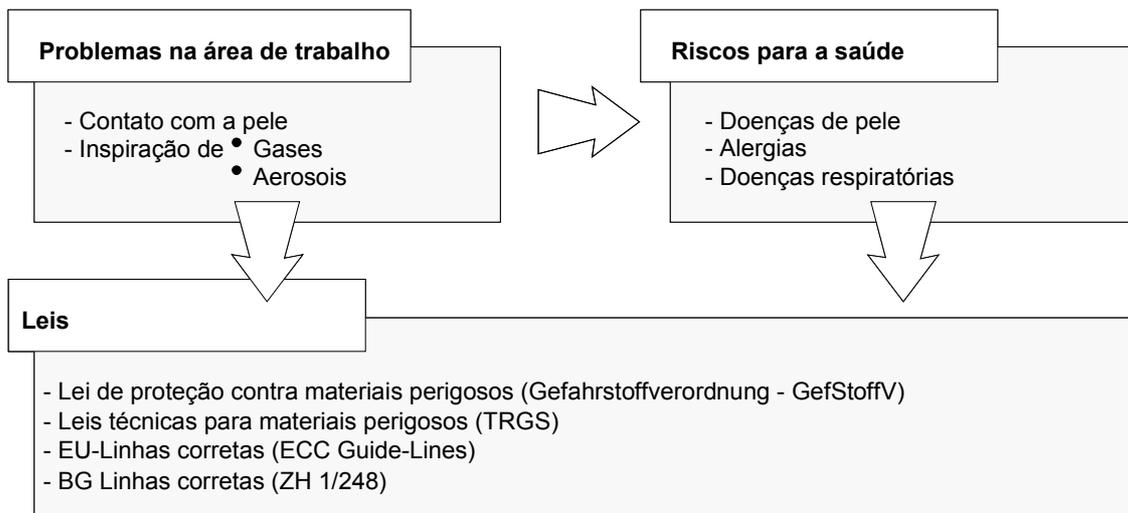


Figura 2. 6 – Leis e normas para a utilização de fluido-lubrificantes adotadas na Alemanha [37]

2.4 Particularidades do Processo de Furação

De acordo com a norma DIN 8589, a furação é definida como um processo de usinagem com movimento de corte circular, ou seja, com movimento rotativo principal. A ferramenta possui movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação, que mantém sua posição em relação à ferramenta e à peça. As variações mais usuais do processo de furação estão resumidas na figura 2.7, sendo indicadas as direções de movimentos usuais.

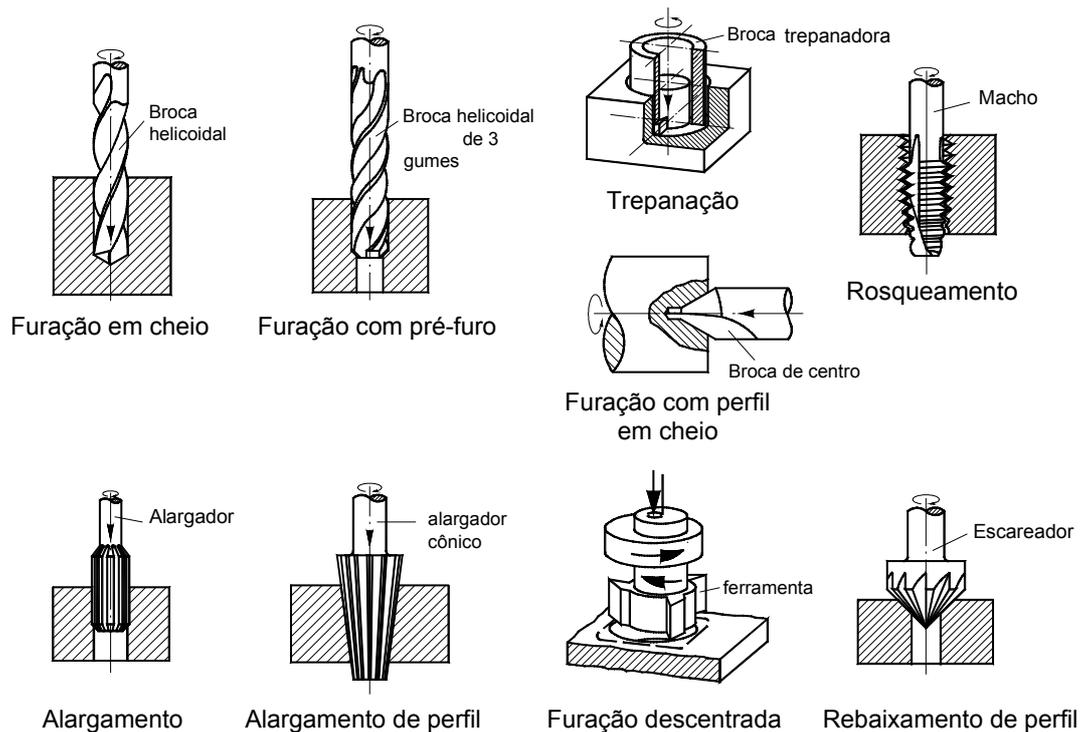


Figura 2. 7 – Variações do processo de furação [4]

O processo de furação apresenta algumas particularidades [4]:

- a velocidade efetiva de corte se reduz em direção ao centro da broca, atingindo o valor da velocidade de avanço no eixo da ferramenta;
- dificuldade no transporte do cavaco;
- distribuição de calor inadequada na região de corte;
- elevado desgaste na quina com canto vivo; e
- o atrito das guias na parede dos furos.

Na furação com aplicação de mínimas quantidades de fluido lubri-refrigerante existe a tendência de maiores temperaturas na região de corte e maior dificuldade no transporte dos cavacos para fora do furo [6 – 8, 11, 37].

2.4.1 Grandezas de entrada e saída do processo de furação

As grandezas de entrada do processo de furação são classificadas em cinco grupos principais: ferramenta, máquina-ferramenta, peça, parâmetros de usinagem e fluido lubri-refrigerante. O resultado de trabalho pode ser descrito por dois grupos: peça e ferramenta. Estas grandezas estão mostradas esquematicamente na figura 2.8.

Na mudança do processo convencional (com aplicação abundante de fluido lubri-refrigerante) para o processo com redução ou eliminação do fluido lubri-refrigerante, tem-se uma alteração de equilíbrio das grandezas de entrada. Esta alteração do equilíbrio pode afetar as grandezas de saída e ter efeitos sobre a qualidade da peça e sobre a vida da ferramenta.

Grandezas de entrada

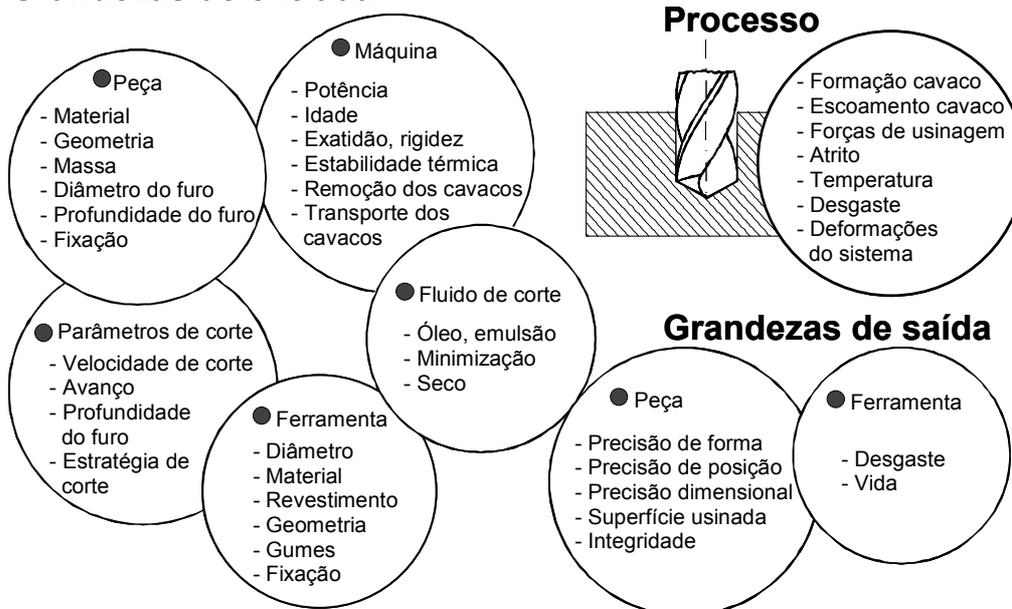


Figura 2. 8 – Grandezas de entrada e saída do processo de furação [40 - 42]

Na mudança de uma operação de furação com aplicação abundante de fluido lubri-refrigerante para o processo com redução ou eliminação do fluido lubri-refrigerante, uma análise sistemática das grandezas de processo deve ser realizada [40 – 42].

2.4.2 Materiais para brocas

Dentre os diferentes materiais utilizados para a confecção de brocas, destacam-se o aço-rápido HSS e o metal-duro. Ambos os materiais encontram um vasto campo de aplicação nas empresas de manufatura e as brocas de metal-duro apresentam cada vez uma maior fatia no mercado de ferramentas para a furação.

O metal-duro é um material sinterizado, composto por carbonetos ligados por um ligante metálico. O ligante metálico, geralmente o cobalto, proporciona tenacidade ao conjunto, sendo que a dureza a quente e a resistência ao desgaste é proporcionada pelos carbonetos [3].

Os metais-duros apresentam como vantagens uma boa distribuição estrutural, dureza elevada, resistência à compressão e ao desgaste a elevadas temperaturas. Este conjunto de propriedades faz do metal-duro um material muito apropriado para a fabricação de ferramentas de corte. As principais classes de metal-duro utilizadas na furação estão apresentadas na tabela a seguir [43].

Tabela 2. 2 – Principais classes de metal-duro utilizadas na furação [43]

Classe	Dureza [HV]	Resistência à flexão [N/mm ²]	Sensibilidade ao lascamento	Aplicação em condições instáveis
K10	1870	3000	Muito alta	Não recomendada
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

2.4.3 Geometria de broca

As brocas helicoidais são as ferramentas mais utilizadas e importantes entre todos os tipos de brocas. Sua participação em todas as atividades de corte de metais está estimada entre 20% e 25% do total, sendo de todas as ferramentas de corte a que é fabricada em maior quantidade e a mais difundida na indústria [4, 44 - 46].

As brocas de metal-duro, por apresentarem uma menor tenacidade que as de aço-rápido, necessitam ter uma geometria de ponta adequada, para que possam se auto-centrar no início do processo de furação, evitando assim uma possível quebra da ferramenta [43].

A figura 2.9 mostra uma broca de metal-duro com geometria helicoidal de 3 gumes, apropriada para a usinagem da liga de titânio Ti6Al4V.



Figura 2. 9 – Broca helicoidal de 3 gumes recomendada para a furação de Ti6Al4V

2.4.4 Esforços de usinagem na furação

Assim como para o processo de torneamento, a força de usinagem que atua sobre a parte cortante durante o processo de furação pode ser decomposta em três componentes: Força de corte (F_c), Força de avanço (F_f) e Força passiva (F_p), figura 2.10.

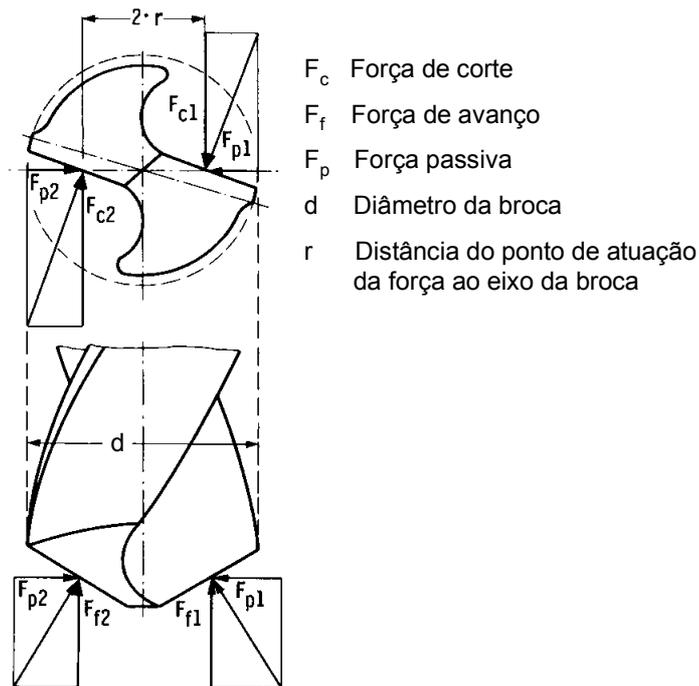


Figura 2. 10 – Componentes dos esforços na furação [4]

A força de corte F_c na furação está distribuída sobre as partes cortantes do gume principal. Para uma afiação correta da ponta da broca as componentes de força de corte distribuída sobre cada uma das partes cortantes da broca são idênticas. Na broca de 2 gumes as componentes de força de corte estão defasadas por 180° , na de 3 gumes por 120° . Pela relação entre o momento torçor na furação e força de corte calculada para uma determinada seção de usinagem, é possível estabelecer a distância “ r ” do eixo de rotação a que esta força é aplicada.

A força de avanço F_f da broca pode ser subdividida em uma parcela decorrente do corte e outra decorrente do esmagamento do material pelo gume transversal. A parcela da força de avanço referente ao esmagamento de material pelo gume transversal pode ser igual ou até superior à parcela referente ao corte pela parte cortante do gume principal.

A força passiva F_p atua nas partes cortantes do gume principal e tem sentidos opostos. A resultante será nula se a geometria da ponta da broca tiver sido corretamente fabricada. Para afiações com pequenos erros a resultante da força passiva é desprezível [2 - 4, 44].

2.4.5 Desgaste em brocas helicoidais

Nas brocas helicoidais, o desgaste apresenta-se na face, no flanco, no gume transversal, na quina e nas guias. Os principais tipos de desgaste em brocas [45] estão listados a seguir e mostrados na figura 2.11.

- desgaste de quina W ;
- desgaste de flanco no ponto médio VB_{MED} ;
- desgaste de flanco máximo VB_{MAX} ;
- desgaste de guia lateral M_w ;
- desgaste de cratera K_m ;
- desgaste do gume transversal medido em relação ao gume de corte (altura) C_t ; e
- desgaste do gume transversal medido em relação ao gume de corte (largura) C_m .

Como principais mecanismos responsáveis pelo desgaste nas brocas, pode-se citar [2 - 4, 44]:

- fadiga térmica e mecânica;
- adesão e cisalhamento;
- difusão;
- abrasão mecânica;
- oxidação; e
- desgaste químico.

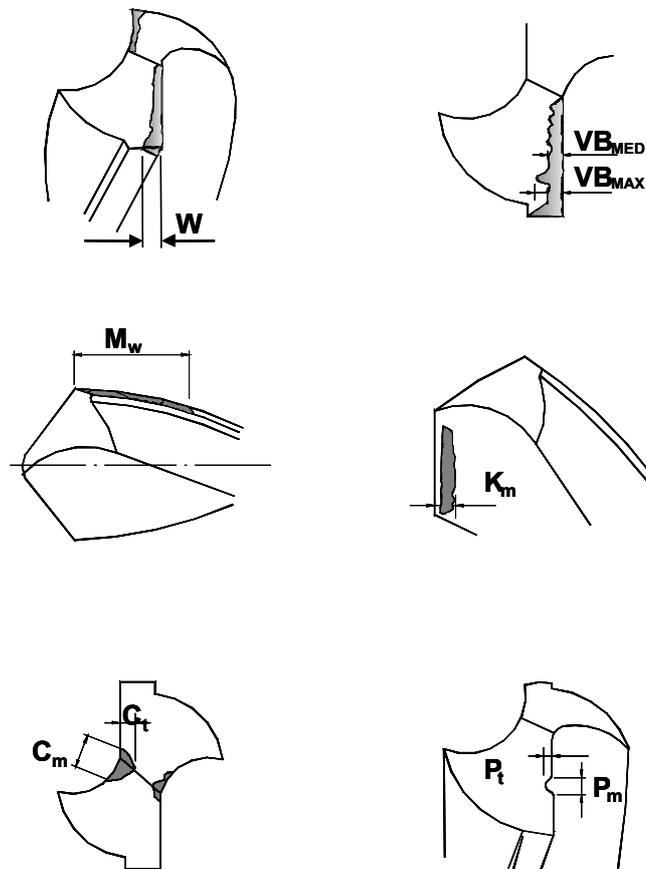


Figura 2. 11 – Principais desgastes apresentados em brocas [45]

Os mecanismos de desgaste associados à fadiga térmica e mecânica no processo de furação decorrem dos choques mecânicos e aquecimento e resfriamento na região de corte, levando à formação de fissuras, micro-lascamentos, deformação plástica e à ruptura da ferramenta de corte. Na usinagem de materiais à base de titânio os cavacos são lamelares e em razão dessa formação de cavaco descontínuo, as ferramentas são solicitadas ciclicamente, tanto mecânica como também termicamente, causando fadiga das partes solicitadas [4, 33].

Os mecanismos de desgaste causados pela adesão ocorrem devido à ruptura de micro-caldeamentos na face da ferramenta. Estes caldeamentos formam-se quando a região de corte está sujeita a altas pressões e temperaturas ou devido à interação das superfícies inferiores do cavaco e da face da ferramenta que, por estarem relati-

vamente livres de óxidos, soldam-se por adesão. O material que caldeia na superfície da ferramenta é deformado pela pressão de corte, vindo a adquirir uma dureza elevada, sendo cisalhado após certo tempo, levando consigo partículas da ferramenta. Na usinagem de ligas de titânio surgem altas tensões de compressão e altas temperaturas na zona de contato da ferramenta, propiciando desta forma condições ideais para a formação de adesão de material na superfície da ferramenta.

Mecanismos de desgaste por difusão ocorrem em temperaturas mais elevadas e dependem das propriedades químicas do material da ferramenta e a afinidade destas com o material da peça. A difusão consiste na ocorrência de uma transferência de átomos de uma área de maior concentração atômica para outra de menor concentração, entre superfícies que possuem afinidade química. Esta transferência pode levar ao enfraquecimento da ferramenta, por exemplo pela formação de carbonetos complexos de tungstênio. A velocidade de difusão é proporcional à temperatura e conseqüentemente o enfraquecimento estrutural da ferramenta se dá segundo as isotermas de aquecimento, propiciando um desgaste na forma de cratera. A reação do titânio com o oxigênio, o nitrogênio, o hidrogênio e o carbono favorece, juntamente com a alta temperatura na zona de corte, o desgaste da ferramenta [4].

No mecanismo de abrasão mecânica, as partículas duras na superfície inferior dos cavacos e na superfície de corte escorregam sob alta pressão e temperatura sobre a face e o flanco da ferramenta, respectivamente, provocando o arrancamento de finas partículas de material da ferramenta de corte. A abrasão sofre considerável influência do aumento da temperatura na zona de corte. Dependendo do material da peça, um aumento de temperatura provoca uma diminuição na dureza da matriz da peça. Assim, as partículas duras presentes no material não pressionam tanto a ferramenta, conseqüentemente, observa-se um menor desgaste abrasivo na ferramenta [4].

Mecanismos de desgaste por oxidação ocorrem devido à presença do oxigênio do ar na região próxima ao corte que está sob elevadas temperaturas.

Mecanismos de desgaste químico são verificados quando a ferramenta está exposta a produtos químicos ativos, geralmente presentes nos fluidos lubri-refrigerante.

Os mecanismos de desgaste são influenciados pelas elevadas temperaturas desenvolvidas na usinagem, ocasionadas principalmente pelo atrito entre a peça e a ferramenta, entre a ferramenta e o cavaco, e pelo trabalho de deformação na raiz do cavaco. Estes dois fatores são basicamente influenciados pelas características mecânicas e físicas do par material usinado, material da ferramenta, e pelos parâmetros de corte e características geométricas da ferramenta. O diagrama de distribuição de calor da figura 2.12 se refere à usinagem de um aço para uma velocidade de corte de 60 m/min. Se for aumentada ou diminuída a velocidade de corte muda a relação. Para velocidades de corte típicas de usinagem de titânio, 15 a 30 m/min, a quantidade de calor transportado pelos cavacos se reduz consideravelmente, sendo que a maior parte do calor é conduzido para a ferramenta.

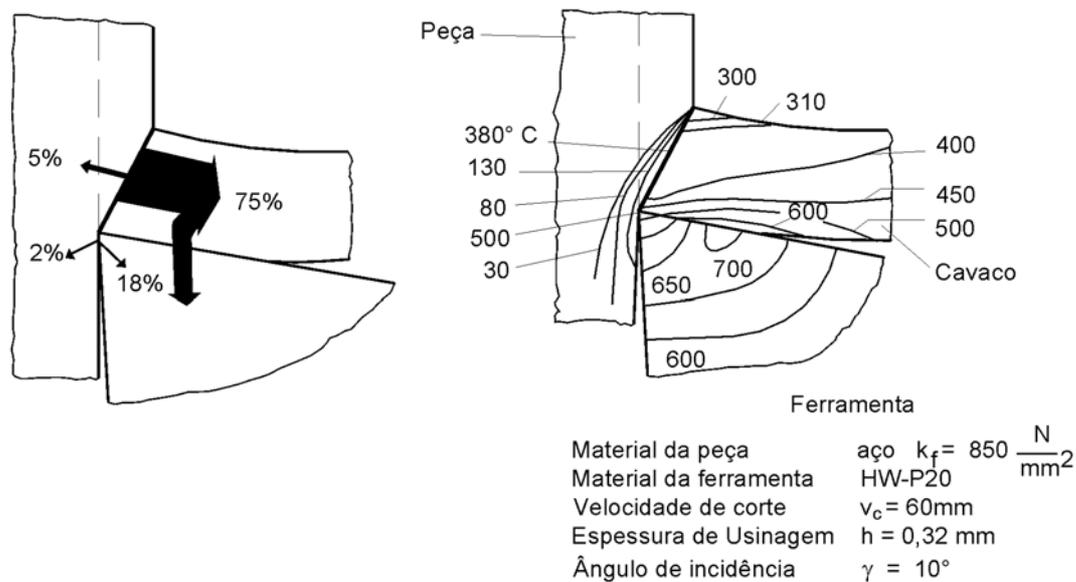


Figura 2. 12 – Distribuição de calor na usinagem de um aço carbonado [4]

2.5 Furação com Mínima Quantidade de Fluido Lubri-Refrigerante (MQF)

O Laboratório de Mecânica de Precisão realizou a primeira aplicação com MQF em 1986, no torneamento de ultraprecisão de cilindros foto-receptores, para a empresa Nashua do Brasil [48]. O mesmo equipamento foi utilizado para ensaios de furação em um trabalho de mestrado intitulado “Furação Profunda no Alumínio de Aviação”

[49]. MÜLLER [50] empregou o mesmo sistema em sua Tese e PINTO [51] aprimorou em sua Dissertação de Mestrado o sistema com 4 bicos controlados eletro-pneumaticamente.

No entanto, a furação industrial com mínimas quantidades de fluidos lubrificantes é relativamente recente e possui ainda uma fatia muito modesta na participação em processos de usinagem nas indústrias manufatureiras. Os principais fatores ocasionadores deste fato são a falta de conhecimentos nesta área, a carência e o custo de máquinas e equipamentos para estas aplicações e o paradigma da mudança e adaptação do processo de fabricação à nova realidade [37].

A furação com MQF ainda requer muito estudo e trabalho. Por exemplo, ainda não se conhecem exatamente os efeitos das quantidades do meio lubrificante que fica suspenso no ar, das quantidades que são arrastadas pelas peças e pelos cavacos, e das quantidades que ficam retidas na máquinas-ferramenta. Não se conhecem todos os efeitos mecânicos e térmicos gerados sobre a máquina-ferramenta, sobre a peça em trabalho e sobre a ferramenta de corte.

Outro fator básico para a não utilização de MQF é a falta de tecnologia de máquinas e equipamentos de atomização de fluidos, mesmo sendo esta área a mais desenvolvida em se tratando deste tema. Diversas empresas fornecedoras de equipamentos de MQF encontram-se consolidadas no mercado.

Com relação às ferramentas de corte desenvolvidas para a aplicação de MQF, pode-se dizer que este é um dos pontos mais críticos, onde momentaneamente existem poucas informações. Ainda não existem estudos que abranjam o vasto campo de ligas e materiais e as faixas de utilização dos parâmetros de usinagem com redução de fluido que permitam que o trabalho se desenvolva em situação estável.

Pesquisadores como KÖNIG, WEINERT, GERSCHWILER, HEWSON e DECHOW, entre outros, contribuem com o preenchimento deste nicho que se encontra nesta área da usinagem. No entanto, a disponibilização de parâmetros tecnológicos ainda é muito pequena. As dificuldades causadas pela ausência destes dados tecnológicos são sentidas nitidamente no desenvolvimento de aplicações de um novo par

material / ferramenta. Para este caso, são necessários estudos para buscar parâmetros de usinagem mais apropriados à nova realidade. A quase totalidade dos parâmetros de corte recomendados pelas empresas fabricantes das ferramentas são indicados para a usinagem com fluido lubri-refrigerante.

Para o uso específico de brocas para a aplicação de MQF, alguns trabalhos analisam ferramentas modificadas, sem no entanto terem atingido uma otimização das mesmas. Para isto, são necessários tempo de pesquisa e recursos. Para a furação de ligas de aço, alumínio e ferro fundido, a seco e com MQF, alguns trabalhos já apresentaram resultados positivos [4, 5, 7, 8, 11, 37, 46]. Para a usinagem de ligas de titânio com MQF não se encontram referências na literatura.

A figura 2.13 mostra uma broca modificada para a usinagem de alumínio com MQF aplicado pelo interior da ferramenta. Especialmente para a furação de alumínio, são freqüentes os problemas de empastamento e entupimento dos canais da broca com o material que é cortado pelo gume principal. Durante o corte, o alumínio escoam com uma determinada pressão sobre a face da ferramenta de corte, sob uma condição de elevada temperatura. Em virtude das propriedades térmicas e mecânicas do alumínio e da ausência de fluido lubrificante na região de contato face da ferramenta / superfície inferior do cavaco, tem-se uma condição adequada para o empastamento nesta região [7].

Pela introdução de um segundo furo de saída para fluido de corte, ligado aos furos de refrigeração, na face da broca, figura 2.13, é possível a redução do empastamento de material. Em consequência da eliminação do empastamento do alumínio nos canais de escoamento de cavaco, obteve-se um aumento da vida da ferramenta de corte. A presença do fluido lubrificante na região próxima ao corte, possibilitou o emprego de aplicação de mínima quantidade de fluido lubri-refrigerante. Assim, apesar de haver uma redução da quantidade do material lubrificante, este foi empregado com uma maior eficiência [7].

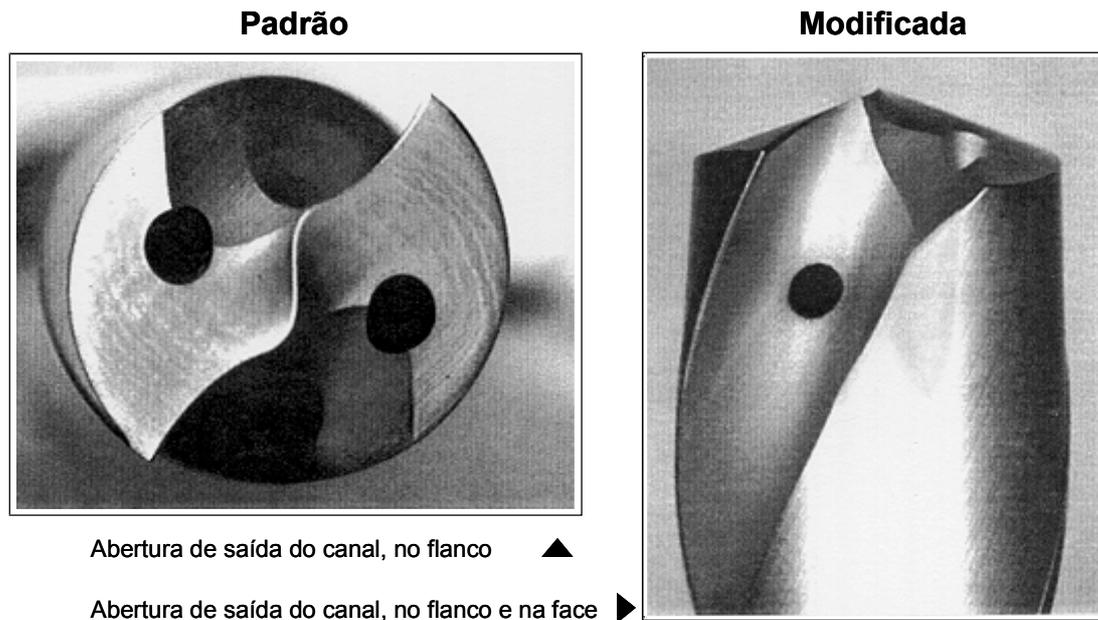
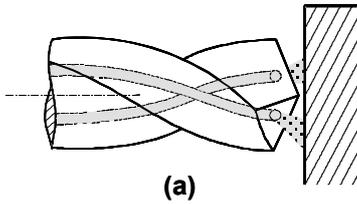


Figura 2. 13 – Broca modificada para a furação de alumínio com MQF aplicado pelo interior da ferramenta [7]

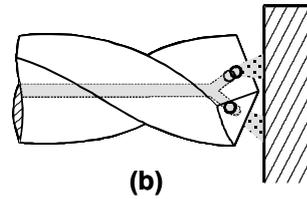
Um outro exemplo de ação de melhoria em uma broca utilizada para a aplicação de MQF pelo interior da ferramenta está mostrado na figura 2.14. Em relação à broca usualmente empregada, foram alterados o furo interno de refrigeração da broca e a saída do furo de refrigeração. O furo interno, anteriormente em forma helicoidal, foi realizado de forma central, como mostrado na figura 2.14. Esta modificação levou a uma redução da força centrífuga atuante sobre o meio aerosol. Isto implica em uma melhor distribuição do fluido atomizado e um melhor transporte das pequenas gotas de óleo contidas no aerosol. A saída bifurcada do fluido, para as faces da ferramenta, apresenta a vantagem do fluido sair nas proximidades da região de contato ferramenta / cavaco. Esta melhoria realizada na ferramenta de corte apresentou ganhos significativos, mesmo para uma redução da quantidade de fluido lubri-refrigerante.

Padrão

- furos em helicoidal
- abertura de saída do furo no flanco

**Modificada**

- furo central
- abertura de saída do furo no flanco e na face

**Campo de aplicação:**

- furação, alargamento, rosqueamento com $d > 4$ mm

Vantagens da geometria modificada:

- pequena força centrífuga sobre o meio
- saída do fluido perto da região de contato

Figura 2. 14 – Modificação do furo interno de refrigeração da broca [46]

Para o processo de furação, devido às particularidades já apresentadas anteriormente, as modificações das ferramentas de corte são mais difíceis e complexas de serem obtidas que para ferramenta de torneamento. Devido a estas dificuldades, a falta de informações para o processo de furação com minimização de fluido lubrificante é mais ampla. [4, 47].

CAPÍTULO 3

JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS DO TRABALHO

3.1 Justificativa do Trabalho

O baixo grau de desenvolvimento de ferramentas de corte direcionadas especificamente para a usinagem de ligas de titânio tem sido a razão de uma maior cobrança sobre as empresas fabricantes de ferramentas de corte, por parte das indústrias de fabricação e transformação de ligas de titânio. O motivo deste descontentamento com as ferramentas indicadas para a usinagem de ligas de titânio pode ser percebido ao se averiguar quais são as ferramentas mais utilizadas pela indústria usuária de ligas de titânio.

Os desenvolvimentos e os aperfeiçoamentos das ferramentas de metal-duro, principalmente para a classe K10, levaram a uma ligeira melhoria dos seus rendimentos na usinagem de ligas ferrosas. O surgimento dos grãos de tamanho fino ($< 0,7 \mu\text{m}$), ultra-fino ($< 0,5 \mu\text{m}$) e super-ultra-fino ($< 0,1 \mu\text{m}$), apresentaram resultados satisfatórios em diversos casos específicos [4, 20, 32]. Entretanto, para as empresas usuárias de ligas de titânio, os resultados obtidos ainda estão longe do esperado e já alcançado na usinagem de outras ligas aeronáuticas, como por exemplo, os bons resultados obtidos na usinagem de ligas de alumínio.

Diversos revestimentos também não mostraram os resultados positivos na usinagem de ligas de titânio, como os apresentados na usinagem de ligas de aço e ferro fundido. Os resultados com ferramentas revestidas, na grande maioria das vezes, foram inferiores aos obtidos com ferramentas sem os revestimentos duros [4, 19, 20, 26]. A explicação pode estar na afinidade química do titânio com a maioria dos elementos químicos constituintes dos revestimentos. Em muitos casos, os revestimentos são compostos à base de titânio, o que explicaria a aceleração da deterioração do revestimento. Assim, tem-se um desgaste maior do que o apresentado por ferramentas não-revestidas [47]. Porém, ensaios desenvolvidos com novos revestimentos, que não são constituídos à base de titânio, também não apresentaram in-

crementos positivos esperados. Por exemplo, na utilização do revestimento de bisulfeto de molibdênio, MoS_2 , os resultados obtidos são semelhantes aos obtidos pelas ferramentas de corte não-revestidas, o que simplesmente não justificaria a sua utilização. Entretanto, devido à eficácia dos revestimentos já terem sido comprovadas para vários pares ferramenta / material, é possível que estes revestimentos ainda não tenham sido empregados nas condições adequadas na usinagem de ligas de titânio.

Em busca de melhores resultados, estudos foram desenvolvidos com ferramentas de conceitos mais recentes, como as ferramentas de diamante policristalino - PKD, o nitreto de boro cúbico – CBN, as ferramentas cerâmicas e o Cermet. A maioria destes estudos foi desenvolvida para o processo de torneamento longitudinal, com parâmetros recomendados pelos fabricantes das ferramentas.

Ensaio de torneamento com emulsão e a seco, com ferramentas de PKD, mostraram resultados semelhantes aos apresentados com ferramentas de metal-duro, e em alguns casos, ligeiramente inferiores. O problema constatado foi o surgimento de um acelerado desgaste de cratera e micro-lascamentos no flanco principal e secundário da ferramenta. A justificativa encontrada está relacionada com as elevadas temperaturas de corte que estão presentes na região de interface entre o gume da ferramenta / cavaco / material. Estas altas temperaturas, em conjunto com a elevada afinidade do carbono com o titânio, apresentam as condições propícias e necessárias à formação de um desgaste de cratera [14, 17, 20].

Um problema semelhante foi constatado na usinagem com ferramentas de CBN, onde estas ferramentas apresentaram resultados ligeiramente inferiores, e em alguns casos, próximos aos obtidos com ferramentas de metal-duro da classe K10.

A motivação para a realização de ensaios com ferramentas cerâmicas na usinagem da liga de titânio Ti6Al4V originou-se dos bons resultados obtidos na usinagem de ligas de níquel. Entretanto, as ferramentas cerâmicas apresentaram resultados sensivelmente inferiores aos obtidos com as ferramentas de metal-duro. As ferramentas de Cermet também apresentaram resultados insatisfatórios na usinagem de ligas de titânio. A elevada afinidade química do titânio com os elementos constituintes destes dois grupos de ferramentas de corte, cerâmicas e Cermet, em conjunto com as ele-

vadas temperaturas alcançadas durante a usinagem, seriam a base da justificativa do acelerado desgaste de difusão e conseqüentemente a deterioração da ferramenta de corte para curtos tempos de usinagem.

Os insucessos obtidos na usinagem de titânio com as novas ferramentas de corte alteraram a direção da busca de bons resultados. Algumas das empresas usuárias destas ligas estão direcionando seus desenvolvimentos na usinagem para alterações de outras variáveis do processo de usinagem, como por exemplo a modificação da forma de aplicação de fluido lubri-refrigerante [47].

A utilização de fluidos lubri-refrigerante a elevadas pressões de trabalho foi uma das alternativas encontradas. O desenvolvimento de ensaios de usinagem com aplicação de fluido lubri-refrigerante a elevadas pressões de trabalho (superiores a 70 bar) apresentaram bons resultados de vida de ferramenta e formação de cavaco, principalmente para os processos de torneamento e furação. Em alguns casos, utilizando-se pressões superiores a 100 bar, as ferramentas apresentaram uma vida média três vezes maior que a condição usual de aplicação de fluido lubri-refrigerante, entre de 2 e 6 bar, que está disponível em grande parte das máquinas-ferramenta encontradas no chão-de-fábrica.

Entretanto, esta alteração do processo não obteve uma grande aceitação por parte das empresas usuárias das ligas de titânio, pois os elevados custos de máquinas e equipamentos especiais para o trabalho com alta pressão de fluido são fatores desmotivadores. Outros problemas relacionados com a usinagem com elevadas pressões de aplicação de fluido são o aumento do consumo do próprio fluido lubri-refrigerante, os riscos oferecidos aos operadores devido às grandes pressões de trabalho e a necessidade de instalação de exaustores de elevada potência nas máquinas-ferramenta. Com isto, a adoção destes sistemas não foi significativa.

Atualmente existe uma tendência na área de usinagem contrária à utilização de grandes quantidades de fluidos lubri-refrigerante. Esta tendência foi apresentada e justificada econômica e ecologicamente no capítulo anterior deste trabalho.

Com base nesta tendência, foram realizados ensaios (pré-testes) de furação a seco da liga de titânio Ti6Al4V, com a finalidade de avaliar a exequibilidade de furos em componentes aeronáuticos.

Os pré-testes desenvolvidos neste trabalho mostraram que a qualidade dos furos obtidos eram ruins. A figura 3.1 mostra a superfície da região de entrada e no meio de um furo realizado a seco.

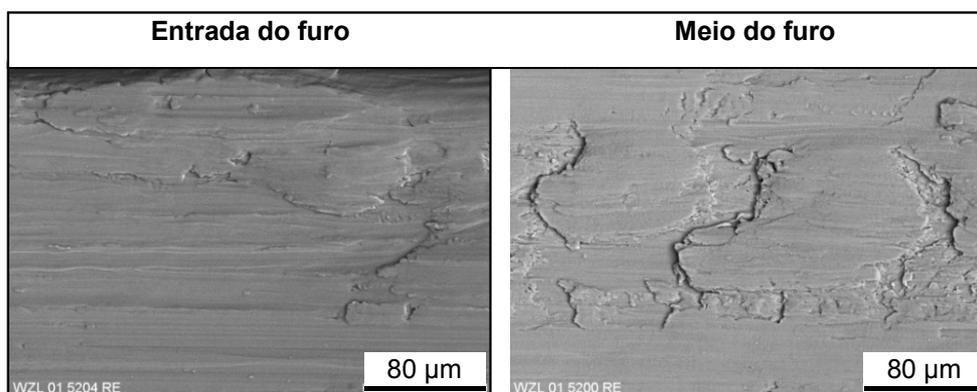


Figura 3. 1 – Região de entrada e meio da superfície de um furo obtido na furação a seco de Ti6Al4V

Para a condição de usinagem a seco, a parede dos furos apresentaram partículas caldeadas sobre a superfície usinada. Esta deposição de material se dá na forma de uma camada fina e endurecida sobre toda a parede do furo, apresentando uma espessura de até 30 µm.

Conforme a avaliação de especialistas de uma empresa fabricante de turbinas aeronáuticas, estes furos obtidos nos ensaios de furação a seco são inadequados para a fabricação de componentes críticos para a indústria aeronáutica.

As ferramentas utilizadas também mostraram indícios de inviabilidade de obtenção de furos com a total ausência de fluido lubri-refrigerante. Na maior parte dos ensaios realizados (pré-testes), foi constatado um caldeamento muito intenso sobre o gume e nos canais de escoamento de cavaco, gerando maiores solicitações mecânicas sobre a cunha. Dessa forma, algumas ferramentas apresentaram ruptura total, após executar um pequeno número de furos. Em alguns ensaios, foi necessária a inter-

rupção da furação, pois os canais de escoamento de cavaco estavam completamente obstruídos pelos cavacos, impossibilitando um fluxo contínuo e regular dos cavacos para fora do furo, provocando uma intensa formação de faíscas e fagulhas do processo. A figura 3.2 mostra uma das brocas utilizadas na furação a seco, após o terceiro furo.

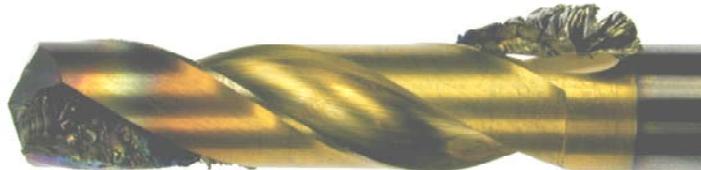


Figura 3. 2 – Broca utilizada na furação a seco com um canal obstruído pelos cavacos

Em decorrência da inviabilidade de aplicação de furos usinados a seco e das motivações oriundas da usinagem com quantidades reduzidas de fluido lubrificante, surgiu o questionamento sobre a viabilidade para a usinagem de titânio sob a condição de aplicação de MQF.

No laboratório WZL estabeleceu-se uma nova linha de pesquisa do Círculo de Trabalhos Tecnológicos, em parceria com empresas usuárias de materiais para a indústria aeronáutica e empresas fabricantes de ferramentas de corte.

As empresas que participaram dessa linha de pesquisa já haviam desenvolvido anteriormente ferramentas para a furação com MQF, para ligas de alumínio e de aço. Estes ensaios foram desenvolvidos em outro projeto e apresentaram bons resultados. O bom resultado obtido com aplicação de MQF para a furação de outros materiais foi um fator importante de motivação para os investimentos na furação de titânio com MQF.

A experiência positiva adquirida anteriormente em projetos realizados com MQF, gerou algumas informações importantes que foram adotadas na usinagem de titânio. As principais informações tecnológicas aproveitadas são referentes a ações de melhorias da geometria da ferramenta de corte e em relação à metodologia de en-

saios adotada no WZL. As melhorias mais significativas com relação à geometria da ferramenta são um aumento da sua conicidade, uma diminuição da largura das guias da broca e um aumento dos canais de escoamento de cavacos. Com base nestas informações foram escolhidas as ferramentas mais adequadas para a furação de titânio.

Duas ferramentas de três gumes, uma com, e outra sem furos de refrigeração interna foram escolhidas para os ensaios. As brocas apresentam uma região central (gume transversal) reforçada e com uma ponta aguda. Isto faz com que a deformação plástica, ocorrida no centro da região de usinagem, seja menor e mais estável. As ferramentas possuem três gumes, afiados, e canais de escoamento de cavaco mais amplos, sem provocar uma perda da sua rigidez. Os canais maiores facilitam o escoamento dos cavacos das regiões de corte, apresentando assim uma redução do empastamento e do entupimento dos canais. O problema de entupimento dos canais de saída dos cavaco apresenta-se freqüentemente para o processo de furação, principalmente sob condição de aplicação de MQF e a seco.

As características das ferramentas escolhidas são adequadas para a utilização de MQF, quando há uma mínima quantidade de lubrificante disponibilizada na região de corte. O aumento da conicidade e a redução da largura das guias da broca, faz com que a necessidade de lubrificante na região de contato entre as guias e a parede do furo também seja reduzida. Teoricamente, uma finíssima película de óleo visa gerar uma lubrificação das partes em contato. Para a condição de MQF aplicado pelo interior da ferramenta, o filme de lubrificante pode chegar nas proximidades da região de corte e nas guias da broca. Assim, esta ferramenta deverá apresentar um comportamento de corte próximo ao obtido na furação com emulsão aplicada pelo interior da ferramenta.

Para a condição de aplicação de MQF com bicos externos à broca, existirá uma maior dificuldade do lubrificante alcançar a região de corte. Principalmente quando a ferramenta estiver a uma profundidade de corte superior a 2 vezes o diâmetro, ocorre um bloqueio do fluido pelo próprio cavaco gerado no interior do furo. O cavaco, ao ser formado, escoar para fora do furo com um preenchimento parcial do canal de escoamento, gerando assim uma barreira quase intransponível para o lubrificante. Com base na suposição das dificuldades a serem encontradas durante a furação

com aplicação de MQF por bicos externos, surgiu o interesse em efetuar estudos com diferentes revestimentos depositados sobre o substrato da ferramenta indicada, da classe K10. Esta decisão é perfeitamente justificável por uma eventual redução das temperaturas a serem geradas no processo, em consequência aos menores atritos nas interfaces ferramenta / cavaco / peça, proporcionados pela fina película do filme depositado sobre o substrato. Desta forma, foram escolhidos os diferentes revestimentos: TiAlN, TiCN e CrCN, que são dotados de características refratárias e ao mesmo tempo proporcionam baixos coeficientes de atrito.

A motivação para o estudo da aplicação de MQF com bicos externos à broca, mesmo com a literatura existente não apresentando resultados satisfatórios, é também justificada pelos baixos custos destes equipamentos, em relação aos demais equipamentos para a aplicação de MQF pelo interior da ferramenta. Este custo também é baixo, se comparado com o custo de adaptação do cabeçote de furação para a utilização de emulsão aplicada internamente, quando este não está disponível na máquina-ferramenta.

3.2 Objetivos do Trabalho

3.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o potencial tecnológico da furação da liga de titânio Ti6Al4V com aplicação de MQF. Para esta condição de trabalho devem ser avaliados os parâmetros de usinagem que mantenham o processo em regiões estáveis de corte, possibilitando uma remoção de material sem comprometer as características de precisão dimensional e as propriedades requeridas na superfície do furo. Estes parâmetros de usinagem devem ser comparados com os usualmente recomendados para aplicação de emulsão, fazendo-se necessária também uma avaliação das alterações das grandezas mecânicas e térmicas influentes sobre a ferramenta de corte e sobre as características do furo gerado.

Para avaliar o efeito das mínimas quantidades de fluido sobre as guias e sobre a face da ferramenta são avaliados os processos de alargamento com gume único regulável e o fresamento periférico com fresas de topo, respectivamente.

Além disto devem também ser discutidas as limitações oriundas da mínima refrigeração e quase ausência de lubrificação no processo.

3.2.2 Objetivos específicos

São dois os objetivos específicos:

Estudo das grandezas mecânicas influentes sobre a ferramenta e sobre a peça

– objetiva avaliar os esforços de usinagem sobre a ferramenta de corte e as características dimensionais e de qualidade do furo resultante da furação. Para avaliar os efeitos mecânicos sobre a ferramenta são medidas as grandezas: a força de avanço F_f , a força de corte F_c , a força passiva F_p e o momento torçor M_t . Para verificar os efeitos mecânicos sobre a peça são medidos os itens: a qualidade dimensional do furo (diâmetro nominal, circularidade e cilindricidade) e a integridade do furo (avaliação óptica da superfície da parede do furo visto de topo e em corte, as deformações plásticas sub-superficiais e a micro-dureza logo abaixo da superfície da parede do furo).

Estudo das solicitações térmicas influentes sobre a ferramenta e sobre a peça

- objetiva gerar conhecimento sobre as temperaturas alcançadas na ferramenta de corte e na peça. Para verificar os efeitos térmicos sobre a ferramenta, propõe-se o desenvolvimento de um sistema integrado de medição de temperatura capaz de fazer a medição da temperatura na proximidade do gume para uma broca em movimento. Para verificar os efeitos térmicos sobre a peça, deve ser avaliada a temperatura na proximidade da superfície do furo gerado, com termo-elementos embutidos em corpos de prova, confeccionados especificamente para estes ensaios.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Metodologia

Este trabalho é baseado em ensaios experimentais desenvolvidos com ferramentas de metal-duro, utilizando máquinas com CNC e equipamentos de aplicação de MQF e emulsão.

De acordo com a metodologia sistematizada no WZL, foram realizadas repetições para quase todos os ensaios. Para alguns ensaios, o número de repetições foi superior a 3 vezes, com o objetivo de adquirir uma maior confiabilidade e segurança dos dados levantados. No entanto, os tempos de trabalho de pesquisas e de desenvolvimento devem fornecer resultados confiáveis nos menores prazos possíveis.

4.2 Grandezas Medidas

As grandezas medidas neste trabalho foram divididas em três grupos principais, conforme os objetivos propostos para este trabalho, figura 4.1.

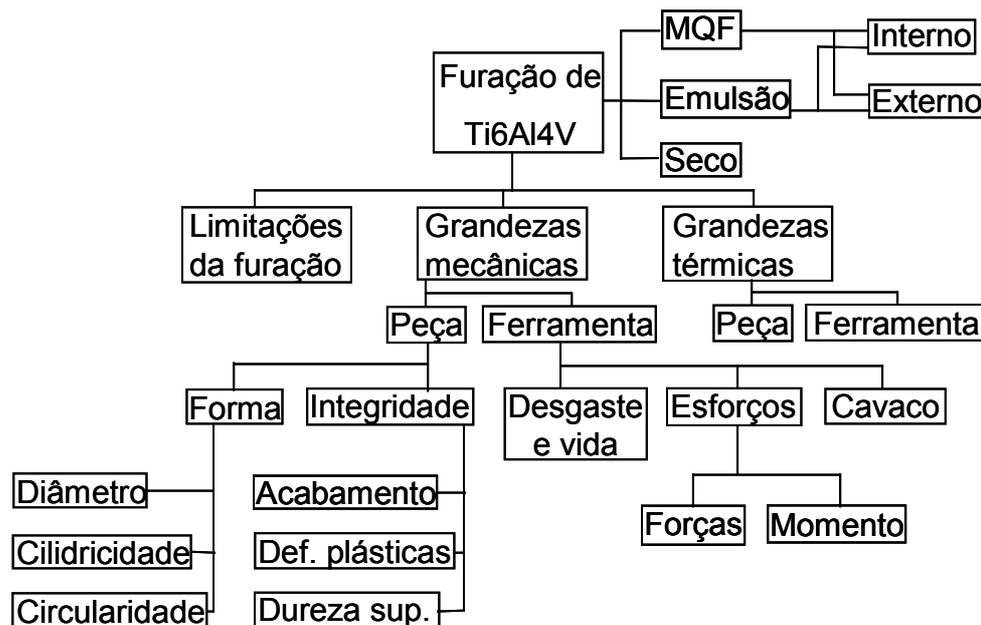


Figura 4. 1 – Diagrama dos ensaios e pontos investigados

As grandezas mecânicas e térmicas envolvidas no processo de furação foram avaliadas para a ferramenta e para a peça usinada. Os efeitos mecânicos sobre a ferramenta de corte foram divididos principalmente em desgaste e esforços de usinagem. Os esforços estão caracterizados pelas principais componentes das forças na furação.

Os efeitos mecânicos sobre a peça foram divididos em efeitos sobre a integridade e sobre a forma do furo. Para o item integridade, foram avaliadas a rugosidade, as deformações plásticas, bem como o endurecimento da superfície da parede do furo (medições de micro-dureza). Neste item, também foram avaliadas a formação de material caldeado (cavaco) na superfície da peça, e a eventual formação de trincas na parede do furo. No que diz respeito à forma do furo, foram avaliados o diâmetro nominal, a circularidade e a cilindridade. A formação de rebarbas também foi alvo de observação.

Para medir as solicitações térmicas sobre a ferramenta foi desenvolvido um Sistema de Telemetria adaptado para a furação. Este sistema permitiu a medição da temperatura na cunha da ferramenta em movimento.

Para a medição da temperatura na peça foram utilizados termo-elementos do tipo K, embutidos em corpos de prova adaptados para a furação, permitindo a medição da temperatura na peça, a aproximadamente 0,2 mm da superfície do furo.

O desenvolvimento da sistemática de avaliação das grandezas influentes sobre o processo, medidas neste trabalho, é apresentada juntamente com a apresentação e discussão dos resultados no capítulo seguinte.

4.3 Caracterização do Material

A liga de titânio empregada para os ensaios realizados neste trabalho, Ti6Al4V (do tipo $\alpha+\beta$), foi fornecida por uma empresa usuária deste material, parceira do projeto. O material foi fornecido na forma de chapas com 20 mm de espessura e dimensões de 600 mm de comprimento por 300 mm de largura. As chapas foram cortadas por serra-fita e posteriormente fresadas para as dimensões adequadas aos diferentes tamanhos de corpos de prova empregados nos ensaios.

Para os ensaios de vida e desgaste foram preparados corpos de prova com dimensões de 200 x 150 x 20 mm. Estes corpos de prova eram fixados com grampos e batentes, de forma a proporcionar um perfeito encosto e fixação para a furação. A flexão do corpo de prova em processo foi medida nos pré-testes e verificou-se uma flexa desprezível.

Nos ensaios de medição de temperatura na peça foram empregados corpos de prova de dimensões 100 x 80 x 20 mm. Os corpos de prova utilizados para a

medição de temperatura foram fixados em um dispositivo fabricado especialmente para estes ensaios. Na execução dos ensaios de medição de temperatura na broca, também foram empregados corpos de prova de dimensões 100 x 80 x 20 mm.

Para os ensaios de análise das componentes das forças de usinagem, os corpos de prova foram preparados de forma a satisfazer as exigências que são melhor detalhadas juntamente com a exposição dos resultados.

A tabela 4.1 apresenta algumas propriedades mecânicas e físicas da liga de titânio Ti6Al4V utilizada nos ensaios, em comparação com a liga de aço SAE 1045 [4].

Tabela 4. 1 - Propriedades mecânicas e físicas da liga de titânio Ti6Al4V, em comparação com a liga de aço SAE 1045 [4]

	Ti6Al4V	SAE 1045
Densidade ρ [kg/dm ³]	4,3	7,8
Resist. à tração R_m [N/mm ²]	970	625
Lim. elástico $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	890	300
Conductiv. térmica λ [W/mK]	10	50

A baixa condutividade térmica do titânio, aproximadamente 1/5 do aço, é um dos fatores responsáveis pelas elevadas solicitações térmicas ocorridas na usinagem. O maior limite elástico e a baixa densidade também são características de destaque desta liga de titânio.

A estrutura da liga de titânio Ti6Al4V empregada nos ensaios é mostrada na figura 4.2. A figura apresenta três micrografias da estrutura, retiradas em planos diferentes (A, B e C), conforme apresenta o esquema na parte inferior à esquerda da figura. É possível a visualização da estratificação da estrutura decorrente da laminação do material (planos A e C), e a homogeneidade da estrutura no plano B. Também podem ser distinguidas as duas fases, α e β , onde a fase- β encontra-se em lamelas mais alongadas, ocasionadas pela mudança da fase- α durante o tratamento térmico do material.

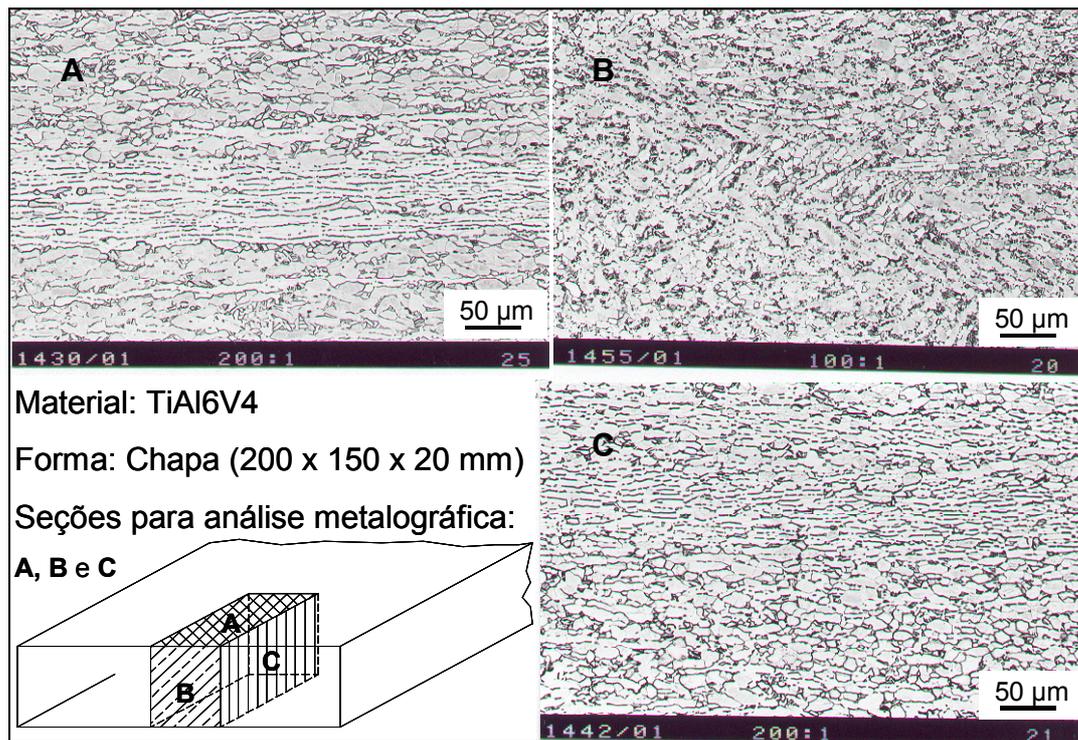


Figura 4. 2 – Estrutura da liga Ti6Al4V utilizada nos ensaios

4.4 Ferramentas

A escolha da ferramenta de corte é um dos fatores mais importantes para se obter o sucesso na adaptação do processo com minimização da quantidade de fluido lubrificante. Neste trabalho foram usadas ferramentas de corte modificadas em relação a sua forma original e ferramentas comercialmente encontradas. Estas modificações foram realizadas com o objetivo de aumentar a eficiência da ferramenta em corte. Parte das ferramentas de corte (as brocas modificadas) não estão disponíveis no mercado. Por esta razão, para a designação das ferramentas de corte empregadas, optou-se por uma nomenclatura utilizada pela ferramenta que pode ser adquirida no mercado. As principais diferenças das brocas modificadas são apresentadas como informações adicionais nas figuras.

As ferramentas de corte empregadas nos ensaios estão divididas em cinco classes principais. As diferenças destas ferramentas de corte são alterações da geometria da broca ou a adição de uma camada de revestimento sobre o substrato comercialmente padronizado. Estas modificações fazem parte do desenvolvimento de ferra-

mentas para a usinagem para a minimização da quantidade de fluido aplicado na furação. As cinco principais classes de ferramentas utilizadas neste trabalho estão apresentadas na tabela 4.2.

Tabela 4. 2 – Principais brocas utilizadas nos ensaios

	Broca				
Nomenclatura	105	125	284	411	25
Revestimento	com e sem	sem	sem	sem	sem
Número de gumes	3	3	2	2	2
Diâmetro [mm]	8,5	8,5	8,5	8,5	9,8
Furo de refrigeração	sem	com	com	com	com

Para estas brocas, as principais características são:

- com ou sem furos de refrigeração interna;
- guias laterais modificadas (reduzidas);
- tratamentos de micro-polimento ou arredondamentos dos gumes;
- chanfros entre as laterais da broca e o flanco;
- com ou sem revestimentos; e
- dois ou três gumes.

Como brocas padrões para os estudos são utilizadas as brocas do tipo 105 e as do tipo 125, por serem as mais indicadas para a furação de ligas de titânio, em sua forma original. A principal diferença entre elas é o furo de refrigeração interno (tipo 125). As brocas que estão disponíveis no mercado não possuem revestimento e as

guias não são reduzidas, no entanto são brocas de custo mais acessível e por isso devem ser testadas em paralelo às ferramentas modificadas. Para as outras brocas (apresentadas na tabela 4.2), as modificações realizadas são detalhadas oportunamente.

Outras brocas que não constam na tabela 4.2, como a broca com ponta de metal-duro inter-cambiável e a broca de diâmetro 12 mm revestida com TiN, entre outras, são apresentadas ao longo do trabalho. Estes brocas foram testadas por serem brocas comerciais e indicadas para a furação de titânio. O objetivo é avaliar o comportamento dessas brocas, disponíveis no mercado,

As brocas 125, 105 e 411 utilizadas nos ensaios, estão mostradas nas figuras 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente.

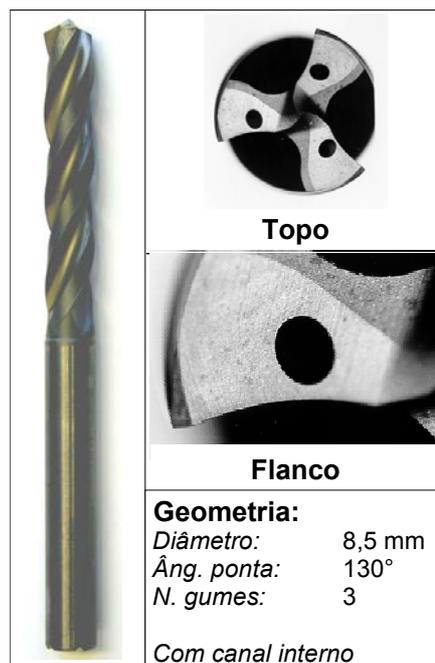


Figura 4. 3 – Broca com furos internos para refrigeração e três gumes (tipo 125)

A broca do tipo 125 é da classe de metal-duro K10, contendo 9,5% de cobalto e com grãos finos. Com um ângulo de hélice $\delta = 30^\circ$ e um ângulo de folga $\alpha = 6^\circ$, a broca possui uma conicidade acentuada (1/100) e uma largura de guia reduzida à metade da usualmente encontrada no mercado (aproximadamente 0,25 mm). Com estas características, deve haver uma redução da área de contato entre as guias e a parede do furo.

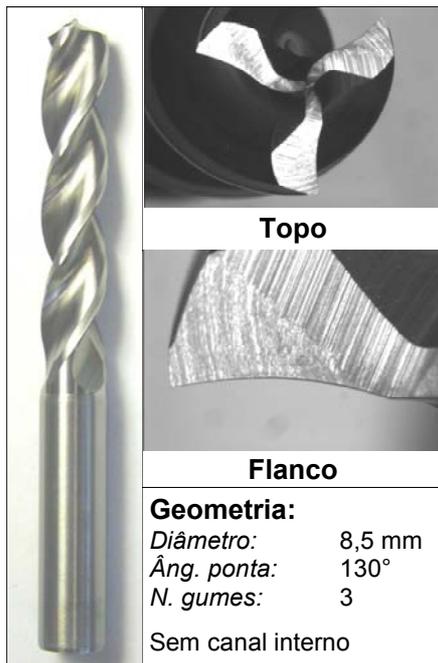


Figura 4. 4 – Broca sem furos internos para refrigeração e três gumes (tipo 105)

A broca do tipo 105 é uma ferramenta disponível no mercado. A broca é da classe de metal-duro K10, contendo 9,5% de cobalto e com grãos finos. Com um ângulo de hélice $\delta = 30^\circ$ e um ângulo de folga $\alpha = 6^\circ$, a broca possui uma conicidade acentuada (1/100) e uma largura de guia de aproximadamente 0,5 mm.

Para este tipo de broca foram fornecidos 3 diferentes revestimentos: TiAlN, TiCN e CrCN. Como descrito no item 3.1, os revestimentos possuem características refratárias, e seu emprego objetiva a redução da temperatura na ferramenta e para o processo de furação para a condição de aplicação de MQF com bicos externos à ferramenta.

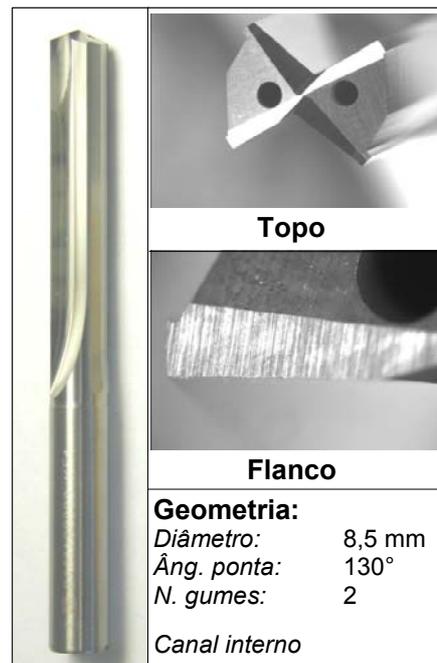


Figura 4. 5 – Broca com furos internos para refrigeração e dois gumes (tipo 411)

A broca do tipo 411 é uma ferramenta disponível no mercado. A broca é da classe de metal-duro K10 e com grãos finos. A broca do tipo 411 é indicada para a usinagem de ligas de alumínio, pois possui canais retos para o escoamento de cavacos, como mostrado na figura 4.5. Entretanto, os catálogos mais recentes de ferramentas para furação indicam bons resultados na usinagem de titânio. Neste trabalho, este tipo de broca foi empregado para os estudos dos esforços de usinagem, pois possuem gumes retos, que facilitaram a interpretação dos resultados de medição das componentes das forças.

Em uma grande parte de furos realizados em componentes de turbinas aeronáuticas, tem-se um processo fino de usinagem posterior ao processo convencional de furação. Este processo posterior objetiva a melhoria da qualidade do furo (dimensional e superficial) e a redução das tensões residuais resultantes do processo de furação convencional [52].

Um dos processos de usinagem mais comumente encontrado posteriormente à furação é o alargamento com gumes ou insertos reguláveis. Neste processo são empregados alargadores com um ou mais gumes, que são reguláveis de acordo com a especificação de tolerância e com a geometria do mesmo. Estes gumes realizam o

acabamento com menores taxas de remoção e parâmetros otimizados para a obtenção das características pré-definidas do furo.

Devido à importância do processo de alargamento na obtenção de furos em componentes de titânio e pela possibilidade de avaliar o efeito da lubrificação com MQF nas guias com geometria modificada destes alargadores, decidiu-se pela avaliação destas ferramentas. Para os ensaios, são adotados alargadores com um gume regulável para MQF aplicado por furos previstos na ferramenta.

O alargador empregado nos ensaios é uma ferramenta disponível no mercado. O inserto é da classe de metal-duro K10 e com grãos finos. Este tipo de alargador é indicado para a usinagem de ligas de titânio com abundância de fluido lubrificante. A figura 4.6 mostra um alargador de gume único regulável empregado nos ensaios.



Figura 4. 6 – Alargador testado com MQF aplicado através de furos previstos na ferramenta

No ensaio de fresamento circular periférico, o objetivo principal é a avaliação da viabilidade de obtenção de uma cavidade com uma fresa circular com aplicação de MQF com bicos externos à ferramenta e a possibilidade de avaliar o efeito da lubrificação com MQF sobre as faces da fresa. As grandezas medidas para este ensaio também são referentes à qualidade dimensional e da superfície da parede da cavi-

dade fresada. Os detalhes da fresa de topo estão mostrados na figura 4.7. A estratégia de fresamento circular periférico é apresentada de forma esquemática na parte inferior da figura 4.7.

Passo 1 – avanço axial da fresa ($d = 8$ mm) de forma centrada num pré-furo ($D = 8,5$ mm) até uma profundidade de 10 mm.

Passo 2 – corte periférico em espiral em 180° , até o diâmetro de cavidade de 10 mm.

Passo 3 – o fresamento circular periférico por 360° para obter o diâmetro final de 10 mm.

Passo 4 – saída em espiral da fresa em 180° , até o centro do furo.

Passo 5 – o recuo axial da fresa em avanço rápido.

As principais características da fresa circular empregada nos ensaios são:

Diâmetro: $d = 8$ mm (para uma tolerância H7)

Comprimento dos gumes: $l = 20$ mm (máximo de profundidade admissível)

Número de gumes: $Z = 3$ (com um gume maior, passante sobre o centro)

Revestimento: TiAlN

Substrato: Metal-duro, Stg25 Micro Grain

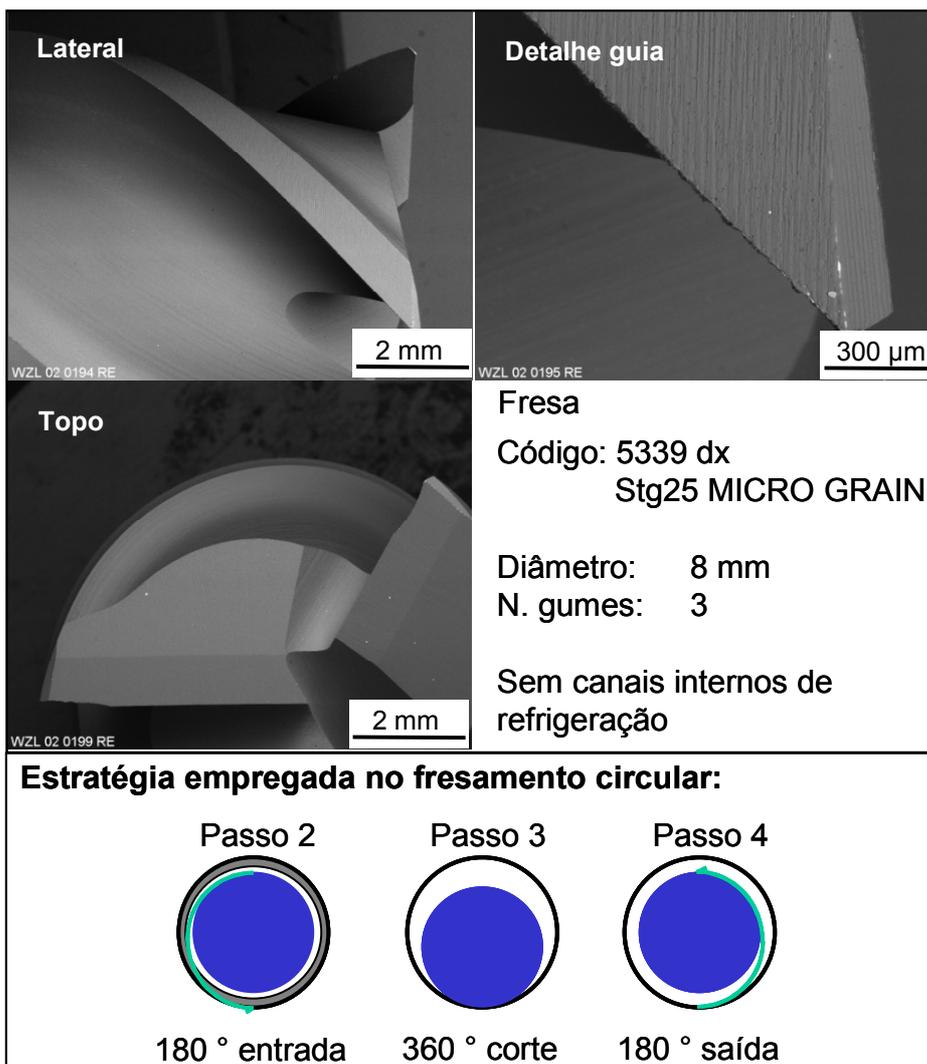


Figura 4. 7 – Fresa e estratégia para o fresamento circular com MQF aplicado por bicos externos

4.5 Condições Lubri-refrigerantes

Neste trabalho foram usados fluidos lubri-refrigerantes comercialmente encontrados. A tabela 4.3 mostra os tipos de fluidos utilizados nos ensaios.

Tabela 4. 3 – Fluidos lubri-refrigerantes

Condição de aplicação	Fluido	Características do fluido
MQF pelo interior	FD 1-30	Óleo especial a base de glicerídeo, decanol e octanol
MQF pelo exterior	FD 1-30	
Emulsão pelo interior	Blasocut BC 25	Óleo mineral miscível em água, sem adição de cloro
Emulsão pelo exterior	Blasocut BC 25	

O fluido FD 1-30 foi utilizado em processo com uma vazão $Q = 50$ ml/h e o fluido Blasocut BC 25 com uma vazão $Q = 15$ l/min.

4.6 Condições de Usinagem

São poucos os parâmetros de corte disponíveis, indicados para a furação sob condições de aplicação de mínimas quantidades de fluido lubri-refrigerante em processo. A grande maioria dos fabricantes indica faixas de parâmetros de usinagem para a condição usual, fluido lubri-refrigerante em abundância. As condições de usinagem inicialmente empregadas neste trabalho foram sugeridas e indicadas pelos fornecedores das ferramentas.

Os principais fabricantes de brocas recomendam os seguintes parâmetros para a furação da liga de titânio Ti6Al4V com uma broca de metal-duro da classe K10:

Velocidade de corte v_c : 30 – 50 m/min

Avanço f : 0,1 – 0,2 mm

Fluido: emulsão em abundância (concentração da emulsão acima de 3,5%)

Os parâmetros de usinagem empregados nos experimentos do trabalho encontram-se num espectro semelhante aos valores recomendados para a furação com fluido lubri-refrigerante em abundância. Para o parâmetro velocidade de corte, que é diretamente influente sobre a temperatura em processo, foram realizados ensaios com valores inferiores a 30 m/min.

Na tabela 4.4 são mostradas as faixas para as condições de usinagem empregadas nos ensaios de furação sob aplicação de mínimas quantidades de fluido lubri-refrigerante.

Tabela 4. 4 – Parâmetros de corte para a furação

Processo	furação com broca				
Tipo da broca	105	125	284	411	25
Furo	passante				
Diâmetro d [mm]	8,5	8,5	8,5	8,5	9,8
Comprimento/diâmetro l/d	2,3	2,3	2,3	2,3	3,5
Velocidade de corte v_c [m/min]	10 – 50			10 - 30	15 - 30
Avanço f [mm]	0,10 – 0,20			0,10 – 0,16	0,10
Condições de lubrificação	MQF ext; Seco	MQF int MQF ext seco	MQF int	MQF ext	MQF int

A tabela 4.5 mostra as faixas das condições de usinagem empregadas para o alargamento com aplicação de MQF.

Tabela 4. 5 – Parâmetros de corte para alargamento

Processo	alargamento
Furo	passante
Relação comprimento/diâmetro l/d	3,5
Velocidade de corte v_c [m/min]	6 - 15
Avanço f [mm]	0,1
Condições de lubrificação	MQF int

A tabela 4.6 mostra as condições de usinagem empregada no fresamento circular periférico com MQF aplicado por bicos externos à ferramenta.

Tabela 4. 6 – Parâmetros de corte para o fresamento

Processo	fresamento circular periférico
Furo	não passante
Diâmetro da ferramenta d [mm]	8
Relação comprimento/diâmetro l/d	1,25
Velocidade de corte v_c [m/min]	40
Avanço f_z [mm]	0,033
Número de dentes da fresa Z	3
Condições de lubrificação	MQF ext

4.7 Máquinas e Equipamentos

Para a usinagem com aplicação de MQF é necessária uma máquina-ferramenta adaptada para este processo. A grande maioria das máquinas em trabalho ainda não é projetada e preparada para trabalhar sobre as condições impostas na usinagem com MQF. Nos experimentos realizados para este trabalho, foram utilizadas diferentes máquinas, na realização de diferentes ensaios, sendo todas as máquinas dotadas de comando numérico e com características apropriadas para os ensaios desenvolvidos. É importante salientar que os resultados não são prejudicados por esta sistemática, pois a divisão e execução dos ensaios ocorreram para diferentes tipos de ensaios. Por exemplo, todos os ensaios de medição de temperatura na peça foram realizados na mesma máquina, e para os outros ensaios esta metodologia também foi respeitada.

Para o desenvolvimento dos ensaios, foram utilizadas três máquinas-ferramentas principais:

- um Centro de Usinagem Vertical CNC Hurth, modelo H-120 ;
- um Centro de Usinagem Horizontal CNC Hüller Hille, modelo NBH-150; e
- um Centro de Usinagem Vertical CNC Chiron, modelo FZ 15 S.

A máquina da Firma Chiron foi concebida dentro do conceito mais moderno de máquina-ferramenta para a usinagem a seco. A máquina foi projetada para ocorrerem mínimas distorções dimensionais, causadas pelas variações térmicas inerentes ao processo. A máquina é dotada de um sistema de MQF para aplicação do fluido (meio aerosol) através do mancal e mandril da ferramenta, isto é, para MQF a ser aplicado pelo interior da ferramenta.

Um dos equipamentos agregados empregados nos ensaios experimentais, foi o equipamento para aplicação de MQF com bicos externos à ferramenta, da Firma Link, modelo G260.

Os equipamentos empregados para aplicação de MQF pelo interior da ferramenta são integrantes nas próprias máquinas-ferramentas utilizadas nos ensaios. Um dos

sistemas de MQF para aplicação pelo interior da ferramenta realiza a mistura do meio lubrificante / ar antes da entrada do mandril (sistema da máquina Chiron) e o outro sistema faz a mistura do meio lubrificante / ar no próprio mandril (sistema da máquina Hüller Hille), em uma pré-câmara de mistura.

Para o desenvolvimento dos experimentos foram utilizadas várias outras máquinas e equipamentos que forneceram suporte técnico para o andamento das atividades programadas. Os principais equipamentos e máquinas empregados estão listados com suas principais características no anexo I.

CAPÍTULO 5

5 GRANDEZAS TECNOLÓGICAS INFLUENTES SOBRE O PROCESSO DE FURAÇÃO DA LIGA Ti6Al4V COM MINIMIZAÇÃO DE FLUIDO LUBRI-REFRIGERANTE

5.1 Fundamentos Tecnológicos

O processo de furação é caracterizado por várias particularidades às quais a ferramenta está submetida, citadas no capítulo 2.4. Para a adequação do processo com usuais quantidades de fluido lubri-refrigerante para mínimas quantidades de lubri-refrigerante ($Q < 100$ ml/h) faz-se necessário uma melhor compreensão do processo e entendimento das grandezas mecânicas e térmicas influentes sobre o processo [47].

Só a compreensão das funções dos fluidos lubri-refrigerantes aplicados em abundância permite o entendimento das conseqüências geradas pela sua ausência durante o corte. A eliminação do fluido lubri-refrigerante não pode ser simplesmente efetuada pela suspensão do fornecimento de fluido da máquina-ferramenta, mas exige uma adaptação do processo à nova situação [7, 37, 46].

5.1.1 Conceitos e funções dos fluidos lubri-refrigerantes

A Norma DIN 51385 classifica os fluidos lubri-refrigerantes em não-miscíveis em água e miscíveis em água, figura 5.1. Os miscíveis em água se subdividem em emulsões e soluções aquosas [4, 56].

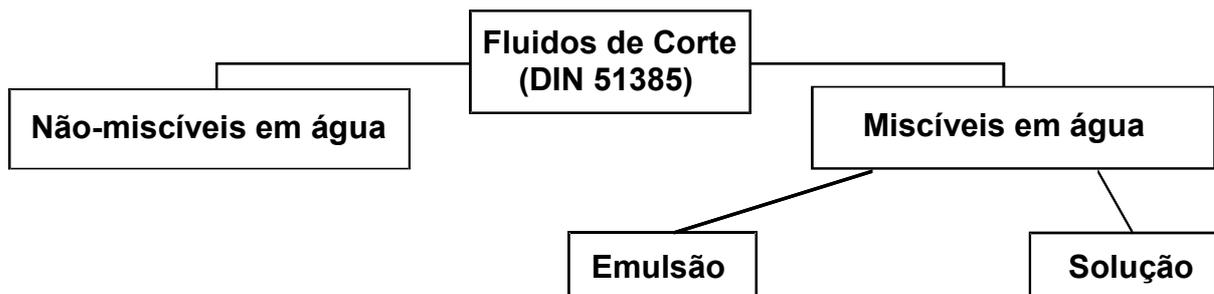


Figura 5. 1 – Classificação dos fluidos lubri-refrigerantes de acordo com a norma DIN 51385

Especialmente para o processo de furação, as emulsões possuem um importante papel [4].

As funções primárias dos fluidos lubri-refrigerantes são: a refrigeração, a lubrificação e auxiliar no transporte dos cavacos da região de corte. Com a refrigeração se reduz a sobrecarga térmica da ferramenta, da peça, do cavaco e da máquina-ferramenta. Com a lubrificação se reduz o calor gerado por atrito. Solicitações térmicas têm influência sobre as tolerâncias dimensionais da peça e sobre o desgaste da ferramenta [4, 7, 46].

Na usinagem com MQF e a seco, tem-se a carência das funções primárias, o que representa mudanças no processo em termos mecânicos e térmicos. A figura 5.2 mostra as conseqüências da carência dessas funções primárias.

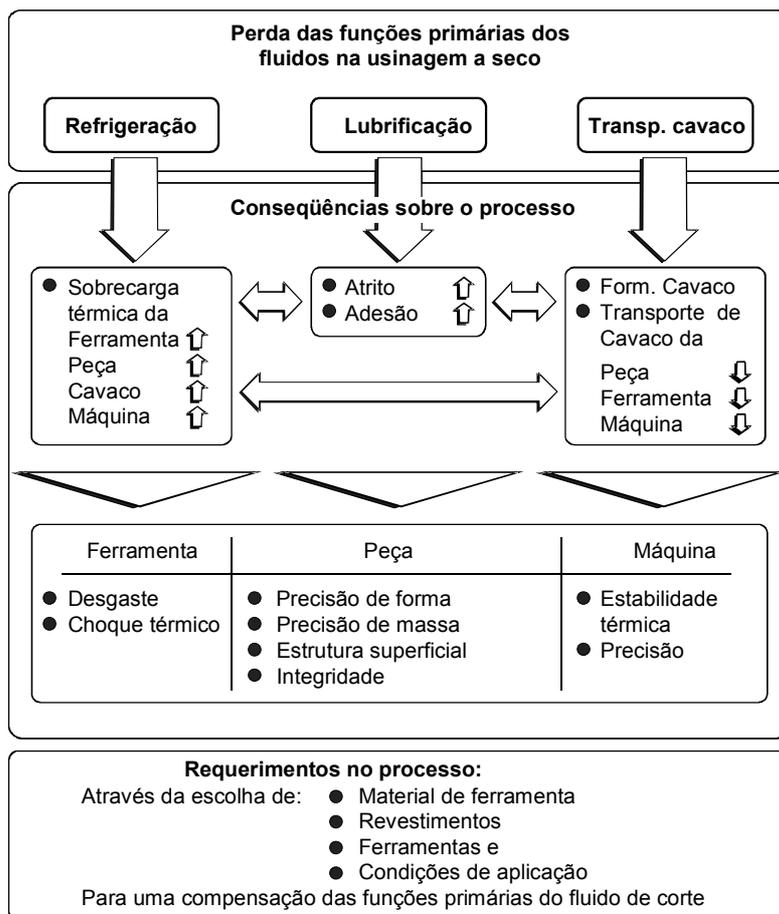


Figura 5. 2 – Carência das funções primárias para a usinagem a seco [57]

Como resultado final da ausência de fluido lubri-refrigerante verifica-se que na ferramenta são intensificados as solicitações térmicas e o desgaste. Na peça são alterados a precisão de forma e de medida, a qualidade da superfície usinada e as influências sobre a integridade. Na máquina-ferramenta são alteradas a estabilidade térmica e a precisão. Para uma compensação das funções primárias do fluido lubri-refrigerante, é necessária a correta escolha do material e da geometria da ferramenta, dos revestimentos destas e das condições de usinagem [57].

Na usinagem de ligas de difícil usinabilidade, como as ligas de titânio, a perda das funções primárias se torna ainda mais crítica. A geração de calor na usinagem de titânio é maior que na usinagem de aço e a elasticidade do material faz com que a pressão exercida pelo material sobre as guias seja maior. Assim o calor gerado por atrito nas paredes do furo também aumenta, aumentando a solicitação térmica da ferramenta.

Na furação de ligas de aço e alumínio, podem ser obtidos bons resultados com aplicação de MQF, que são diretamente dependentes da correta seleção da ferramenta de corte, da geometria, dos parâmetros de usinagem e da escolha da máquina-ferramenta [6 - 9, 46 - 48].

A usinagem com MQF dispõe de variáveis do sistema de MQF que interferem diretamente no processo. Variáveis como o tipo de aplicação (MQF aplicado pelo interior da ferramenta ou aplicado com bicos externos), as quantidades de óleo e ar envolvidas na mistura do meio lubrificante, e a pressão de trabalho do sistema têm influência sobre o processo.

A aplicação de MQF com bicos externos pode ser comparada em alguns casos com a condição de usinagem a seco, pois o filme de óleo aplicado com bicos externos à broca apresenta um efeito máximo de lubrificação até uma profundidade de furação em torno de 1,5 vezes o diâmetro da broca [9]. Na furação com profundidades superiores a 1,5 vezes o diâmetro da broca, a formação de cavacos emaranhados em torno da ferramenta de corte impede que o lubrificante entre no furo. A figura 5.3 mostra uma broca, após a execução de um furo na liga Ti6Al4V, com aplicação de MQF por bicos externos com um emaranhado de cavacos ao redor da broca.

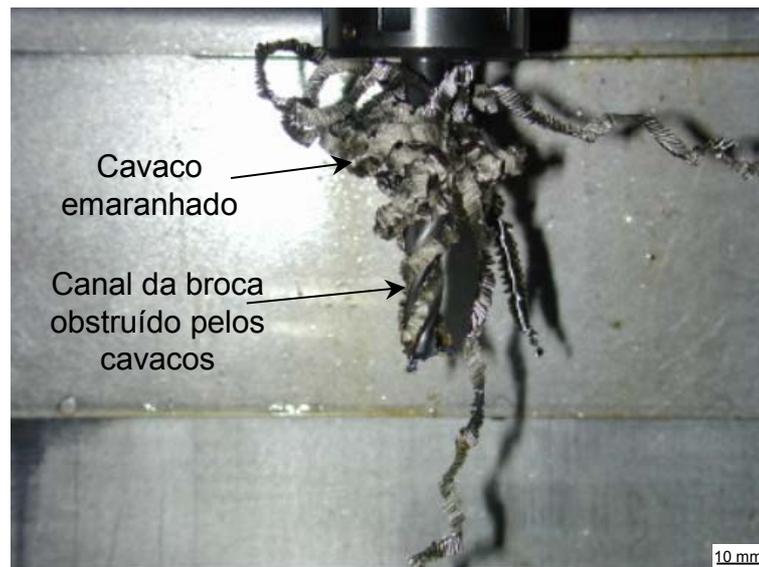


Figura 5. 3 – Típico cavaco obtido para a aplicação de MQF com bicos externos e a seco

Com a obstrução do lubrificante à região de corte, a uma determinada profundidade de furação, os efeitos térmicos sobre a parede do furo podem ser percebidos na transição da região micro-lubrificada (sob efeito do MQF aplicado por bicos externos) para a região não lubrificada, onde não há mais a presença do fluido. A figura 5.4 mostra duas fotos da superfície de um furo realizado com aplicação de MQF externamente. A fotografia (1), à esquerda, mostra uma região próxima à entrada do furo, e a fotografia (2), à direita, mostra a superfície de um furo a uma profundidade de 10 mm.

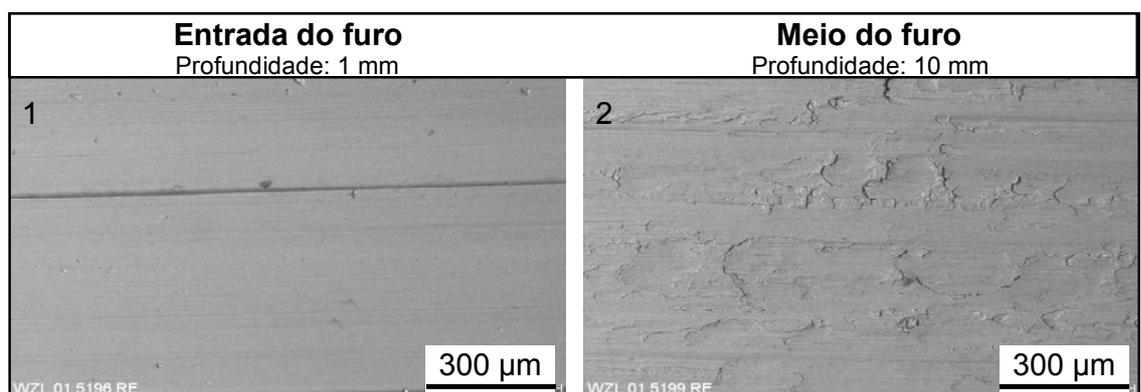


Figura 5. 4 – Região na entrada e no meio do furo obtido com MQF aplicado por bicos externos

A diferença de textura do furo indica que, para uma profundidade de 10 mm, equivalente a 1,17 do diâmetro da broca, o efeito do lubrificante era deficiente. Dessa forma, a carência de um micro-filme lubrificante propiciou o aumento do atrito entre as guias e a parede do furo, e conseqüentemente um super-aquecimento do material. Este material aquecido e pressionado pelas guias da ferramenta deformou-se plasticamente e caldeou-se sobre a superfície do furo.

O problema de caldeamento de material sobre a superfície do furo é extremamente crítico em peças onde são exigidas determinadas qualidades superficiais, como na fabricação de elementos de turbinas. Neste tipo de superfície é propícia à formação de tensões residuais na superfície usinada. Na medição das grandezas de rugosidade não se pôde identificar este problema, fazendo-se necessária uma visualização do furo em um microscópio óptico. Desta forma, torna-se praticamente inviável a adoção do processo de furação a seco ou com MQF aplicado com bicos externos, para obtenção de furos com profundidades superiores ao seu diâmetro.

O fato de para uma furação a seco ou com MQF aplicado com bicos externos levar a uma qualidade inadmissível do furo a partir de uma determinada profundidade de furação é a motivação para procurar uma alternativa que permita obter um melhor resultado. Uma das alternativas possíveis é garantir que mínimas quantidades de lubrificante atinjam o fundo do furo, e assim possam garantir a lubrificação das guias da broca contra a parede do furo, pelo uso de um sistema que alimenta uma nevoa de óleo e ar através dos furos internos da broca. Outras medidas preventivas ao caldeamento são o aumento da conicidade da broca (1:100) e adequação da largura das guias (0,20 mm), diminuindo desta forma o contato destas com a parede do furo.

Para a furação com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta não foram constatados os problemas de cavaco emaranhado na broca e a formação de uma camada de material caldeado sobre a superfície do furo. Nesta condição de aplicação de fluido através da ferramenta, a pressão da mistura ar – lubrificante, e a sua presença nas regiões de contato entre as guias e a parede do furo, garantiram uma melhor ruptura do cavaco, conseqüentemente um melhor escoamento para fora do furo. Desta forma, com o menor atrito entre as guias e a parede do furo, houve a redução do calor gerado e a eliminação do efeito de caldeamento na superfície da parede do

furo. Este tema é melhor detalhado no item 5.2.2, que descreve efeitos sobre a peça.

Na furação com MQF aplicado pelo interior da broca, mesmo após a execução do sexto furo, ainda não há presença de cavaco emaranhado na broca, figura 5.5.

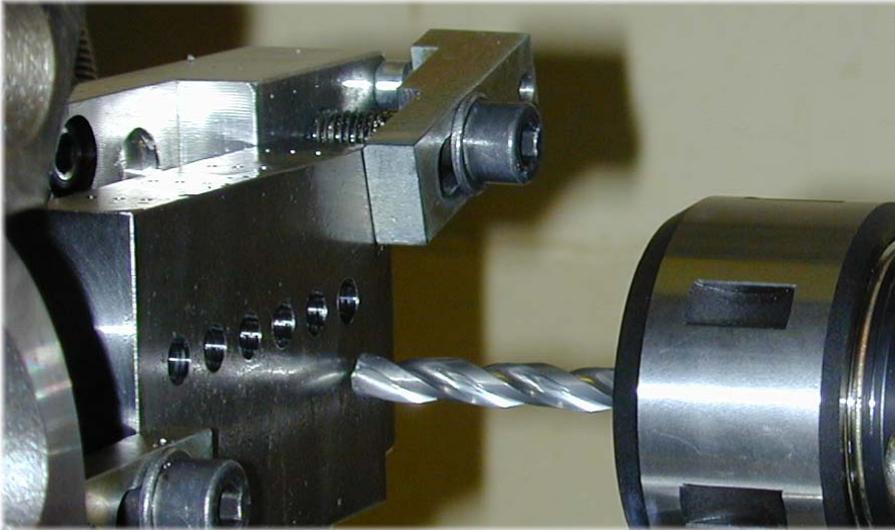


Figura 5. 5 – Broca posicionada para a furação, para MQF aplicado pelo interior da ferramenta

Para a furação com emulsão aplicada internamente, com usuais condições de pressão de fluido, até 30 bar, e para elevadas pressões de trabalho, superiores a 70 bar, os cavacos obtidos não permaneceram emaranhados na broca. Os cavacos apresentaram-se menores que os obtidos na usinagem com MQF e a seco. As diferenças na formação de cavaco para o espectro de pressão entre 30 e 70 bar não se apresentaram relevantes durante o desenvolvimento dos ensaios.

Na furação com emulsão aplicada pelo interior da ferramenta, as diferenças no tamanho dos cavacos foi constatada com a variação da velocidades de corte. Para menores velocidades de corte os cavacos apresentaram-se menores. Isto pode ser explicado pelo maior tempo de escorregamento das lamelas, facilitando o rompimento das lamelas com uma maior frequência.

Para esta condição de aplicação de fluido lubri-refrigerante foi constatada uma redução da formação de aderência de material no gume da ferramenta, resultante da

abundância de fluido lubri-refrigerante em processo, conseqüentemente uma melhor lubrificação do gume.

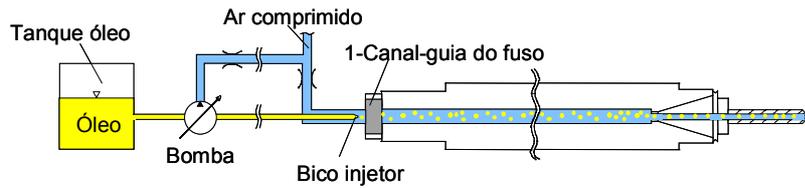
5.1.2 Conceito e classificação dos sistemas de aplicação de MQF

O conceito de sistemas de minimização de fluido lubri-refrigerante é amplo e possui ainda muitos pontos a serem padronizados e normalizados. Para cada fabricante de sistemas de MQF, existem dados informativos sobre as características do equipamento e do meio lubrificante gerado. A metodologia empregada pelos diferentes tipos de equipamentos para a obtenção da formação de uma micro atomização do óleo lubrificante é variada.

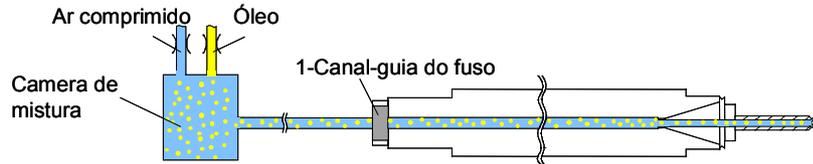
Na minimização de fluido lubri-refrigerante, é usual o emprego de óleo, que é misturado com o ar comprimido, ou até mesmo é empregada a emulsão. Este último, também pode ser misturado com o ar comprimido. Atualmente, existem vários conceitos de equipamentos e de sistemas de minimização de fluidos lubri-refrigerante, e estes empregam diferentes tipos de fluidos [48]. A figura 5.6 mostra, esquematicamente, dois sistemas distintos de MQF para aplicação do lubrificante pelo interior da ferramenta.

Os sistemas de MQF para aplicação pelo interior da ferramenta podem empregar conceitos diferentes de mistura ar e óleo. A mistura pode ser realizada fora, ou dentro do fuso da máquina. A mistura realizada fora do fuso é feita numa câmara de mistura antes de chegar ao fuso. Para máquinas-ferramentas já existentes, geralmente se faz a adaptação do sistema de mistura após o fuso. Neste caso, a opção mais comum, devido principalmente ao baixo custo do acessório, é o sistema no qual o meio aerosol entra através de uma mangueira conectada a um sistema adaptado entre o fuso e o mandril de fixação da ferramenta, figura 5.7.

Sistema a:



Sistema b:



Fonte: Link, Sinis

Legenda: Ventil

Figura 5. 6 – Sistemas de atomização de óleo para MQF aplicado pelo interior da ferramenta

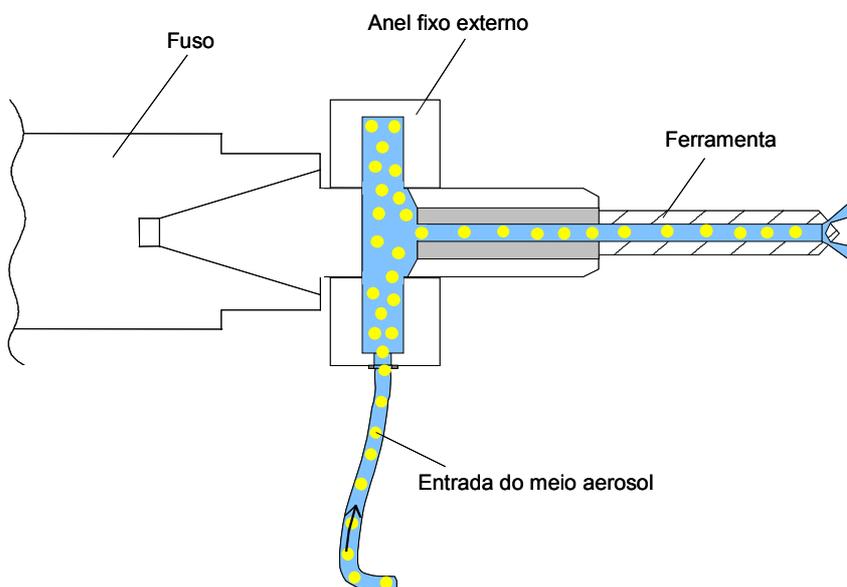


Figura 5. 7 – Sistema para aplicação de MQF pelo interior da ferramenta, através da entrada do meio aerosol entre o fuso e o mandril [37]

Nos ensaios com o sistema no qual o meio aerosol entra através de uma mangueira conectada a um sistema adaptado entre o fuso e o mandril, foi necessário reduzir o número de furos realizados seqüencialmente. Esta redução se fez necessária em consequência ao super-aquecimento do sistema de fixação da ferramenta, resul-

tante do atrito entre as partes em movimento, sistema adaptador e anel fixo externo. Dessa forma, a furação ficava limitada devido ao tempo necessário para o resfriamento do sistema, inviabilizando a sua utilização em escala industrial.

Para os sistemas de aplicação de MQF que utilizam bicos externos à broca, a dificuldade da condução do meio lubrificante através da ferramenta é eliminada. Para este sistema, como descrito no item 5.1.1, o fator limitante é a garantia que mínimas quantidades de lubrificante atinjam o fundo do furo.

Os principais componentes de um bico para aplicação externa de mínimas quantidades de fluido lubri-refrigerantes estão mostrados na figura 5.8, juntamente com as variantes, as vantagens e o campo de aplicação. A figura mostra a entrada do óleo através de uma mangueira de menor diâmetro que chega ao bico, dentro de uma outra maior que conduz o ar comprimido. A mistura é procedida na saída do bico, a aproximadamente 30 mm da região de usinagem.

Misturador externo com tubeira

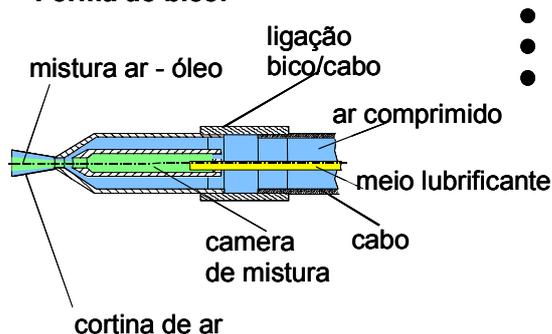
Variantes:

- 1 bico
- mais bicos
- energia contínua
- pulsada
- óleo-ar-mistura
- óleo

Vantagens:

- poucas adaptações
- sem fuso especial (condução interna)
- sem ferramenta adaptada
- preço

Forma do bico:



Campo de aplicação :

- trabalho com chapas
- corte, torneamento, fresamento
- furação, rosqueamento, alargamento com $l/d < 2$

Para: Link

Figura 5. 8 – Bico de mistura para aplicação de MQF externamente [37]

O correto posicionamento dos bicos externos à ferramenta é fundamental para que mistura de óleo e ar atinja a maior profundidade possível do furo. A figura 5.9 apresenta um esquema do posicionamento dos bicos de aplicação de MQF externos à broca, recomendado pela empresa Steidle [58], um dos fabricantes de sistemas de

aplicação de MQF. Esta recomendação foi adotada para todos os ensaios com MQF aplicados com bicos externos.

BRINKSMEIER [60] avaliou o número de bicos no fresamento e concluiu que existe uma leve melhora no comportamento de desgaste da ferramenta quando são empregadas dois bicos externos ao invés de apenas um.

Neste trabalho de pesquisa, a influência da posição e do número de bicos empregados na aplicação de MQF não foi analisada. No entanto, em pré-testes com aplicação de MQF com um e com dois bicos externos posicionados em 180° entre si, foi perceptível uma ligeira melhora da forma do cavaco. A explicação deste fenômeno está no aumento da quantidade de óleo lubrificante. Outra vantagem da utilização de dois bicos externos é a melhor distribuição do lubrificante em torno da ferramenta. Por isto, esta metodologia foi adotada para todos os ensaios realizados com aplicação de MQF utilizando bicos externos.

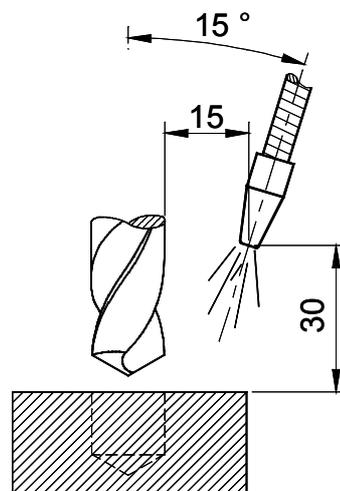


Figura 5. 9 – Recomendação para o posicionamento do bico externo à broca [58]

As características do meio aerosol obtido na saída do bico de mistura também são informações importantes numa avaliação mais detalhada da aplicação de MQF. O diâmetro das partículas de óleo atomizadas pelo sistema foi medido pela empresa fabricante do equipamento empregado nos ensaios experimentais deste trabalho [59]. A ordem de grandeza do diâmetro dessas partículas encontra-se na faixa de 1 a 20 μm . Esta dispersão está na forma aproximada de uma distribuição normal. Os

diversos fatores influentes sobre a atomização do óleo em um determinado duto de ar comprimido e os erros oriundos da dificuldade de medição podem ser a explicação da dispersão dos valores obtidos. O volume médio destas partículas é aproximadamente de $7 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$ [59]. Conforme informação de especialistas da área de minimização de fluido lubri-refrigerante [47, 59], teoricamente, quanto menores as partículas de óleo e maior a homogeneização destas partículas no meio gasoso, melhores são os resultados obtidos na usinagem. Para a alimentação de MQF pelo interior da ferramenta, partículas de óleo muito grandes podem levar a problemas de acumulação de óleo nas paredes dos dutos de escoamento, ocasionado pela força centrífuga resultante da rotação da ferramenta.

5.2 Grandezas Mecânicas Influentes sobre o Processo

As principais grandezas mecânicas influentes sobre o processo de furação com minimização de fluido lubri-refrigerante estão divididas neste trabalho em efeitos sobre a ferramenta de corte e efeitos sobre a peça.

5.2.1 Efeitos sobre a ferramenta de corte

Os efeitos mecânicos sobre a ferramenta de corte estão subdivididos em uma avaliação dos fatores influentes sobre o comportamento do desgaste e da vida da ferramenta, os esforços de usinagem e a formação de cavacos em processo. Os esforços estão também caracterizados pela medição das principais componentes das forças de usinagem: a força de corte F_c , a força passiva F_p e a força de avanço F_f . A grandeza do momento torçor M_t e o efeito do atrito originado pelas guias da broca também foram alvo de estudo.

a) Desgaste e vida da ferramenta

O comportamento de desgaste da ferramenta de corte é diretamente proporcional às solicitações mecânicas e térmicas às quais o gume encontra-se submetido [2]. Para o processo de furação, onde existem diversas particularidades já citadas no estado da arte, estas condições se intensificam com a redução da quantidade de lubri-refrigerante empregado em processo.

O estudo do comportamento do desgaste e da vida da broca se deu na forma de uma avaliação dos critérios estipulados de fim de vida e o levantamento dos problemas registrados durante o decorrer dos experimentos.

Os critérios de fim de vida da broca foram adotados de acordo com os critérios empregados nas empresas usuárias de ligas de titânio, parceiras do trabalhos desenvolvido, sendo os seguintes:

- o lascamento parcial ou total do gume principal ou secundário da broca;
- o lascamento parcial ou total da quina ou do gume transversal da broca;
- o lascamento parcial ou total de uma das guias;
- o desgaste de flanco máximo VB_{MAX} igual ou superior a 0,20 mm; e
- o acabamento ruim ou cavacos caldeados sobre a superfície da parede do furo.

Para grande parte dos ensaios realizados, o critério de fim de vida registrado foi o lascamento da quina da broca, entre o gume principal e a guia. A figura 5.10 mostra um lascamento típico, registrado após a execução do vigésimo furo, em um ensaio com MQF aplicado pelo interior da ferramenta do tipo B125.

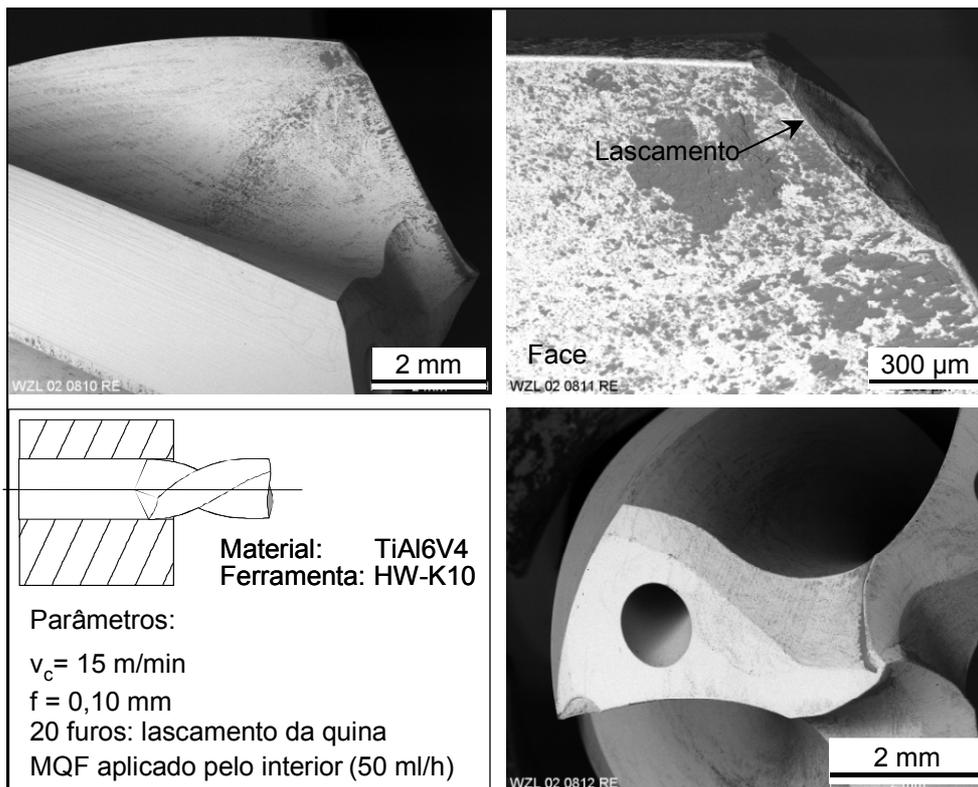


Figura 5. 10 – Vistas da broca ensaiada mostrando o lascamento da quina

Para todas as formas de aplicação de fluido lubri-refrigerante o lascamento da quina foi representativo. Para a furação com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta, o lascamento da quina da broca apresentou-se como o critério predominante de fim de vida. Para esta condição de aplicação de fluido, para quase todos os ensaios realizados, houveram lascamentos na quina sem que o desgaste de flanco fosse significativo, como mostrado na figura 5.10. A figura mostra o lascamento e o estado em que o gume da ferramenta se encontrava após a execução do vigésimo furo. Para esta broca, apresentada na figura, é possível verificar apenas uma pequena aderência na face e na região central da broca. O desgaste de flanco máximo no fim de vida desta ferramenta ainda não era mensurável.

A avaliação dos lascamentos ocorridos ao longo do desenvolvimento dos ensaios mostra que, na maioria das vezes, os lascamentos ocorrem na direção das maiores tensões mecânicas. Como as forças de corte foram os maiores esforços da resultante sobre o gume (melhor detalhado no item das forças de usinagem), somadas às altas temperaturas alcançadas durante a furação (melhor detalhado no item das temperaturas medidas em processo), houve as condições propícias à fragilização e formação de lascamentos na quina das brocas.

Na quina da ferramenta tem-se a condição de corte mais severa na furação. Maior velocidade de corte, maior temperatura devido ao atrito cavaco / ferramenta e guia / parede do furo. Além disto, a quina apresenta a pior dissipação de calor, pois está apoiada em menos massa que o restante do gume. Com isto a sollicitação térmica da quina é a mais severa. A flutuação da força de usinagem, decorrente da formação de cavacos na forma de lamelas, e o choque térmico a que a quina da ferramenta é submetida no final da furação podem ser responsabilizados pelo lascamento preferencial da quina.

Na furação com aplicação de MQF com bicos externos surgiram muitas dificuldades na realização das medições de desgaste e na avaliação da existência ou não de lascamentos, devido à grande formação de aderências sobre os gumes e sobre as guias da broca. Em ensaios iniciais experimentou-se a retirada destas aderências para facilitar a medição do desgaste. Após esta ação de retirada de material aderido, percebeu-se que haviam lascamentos em posições incomuns no gume. Estes lascamentos foram originados pelo efeito da retirada da solda fria, responsável pela formação de pequenas aderências de material caldeado sobre o gume, com características termicamente frágeis e com uma resistência mecânica debilitada e suscetível a quebra. Estes pontos de solda fria, quando solicitados mecanicamente, para a remoção da aderência, levaram ao arrancamento de pequenos pedaços do substrato da ferramenta de corte.

Os ensaios que apresentaram lascamentos devido ao efeito da solda fria, foram desprezados e optou-se por não retirar mais o material aderido ao gume da ferramenta. Nos ensaios onde não houve a possibilidade de medição do desgaste de flanco, estes valores não foram avaliados. Na planilha de ensaios, ao invés dos valores de desgaste de flanco, foram descritas características da aderência. Se a qualidade do furo permanecia em bom estado, visualmente analisado, os ensaios prosseguiram até a próxima avaliação do desgaste.

As brocas que apresentaram problemas de aderência, ao término dos ensaios, foram devidamente cadastradas e fotografadas para posterior análise. A documentação fotográfica foi realizada das vistas laterais (com detalhes das guias), das faces, dos flancos e das quinas.

A figura 5.11 mostra o comportamento da vida da ferramenta para as diferentes condições de aplicação de fluido testadas. A figura está contemplada para três diferentes velocidades de corte (15, 30 e 40 m/min), para um máximo de 30 furos pré-estipulado. À direita da figura existem duas legendas. A legenda superior é utilizada para representar o tipo de broca (por exemplo broca do tipo 125) e a respectiva condição de aplicação de fluido, em uma forma resumida. A representação resumida da condição de aplicação de fluido de corte é adotada para várias figuras que se seguem e está de acordo com a seguinte forma:

- MQF ext, aplicação de MQF por bicos externos;
- MQF int, aplicação de MQF pelo interior da ferramenta;
- seco, o ensaio ocorreu a seco;
- E int, aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta; e
- E ext, aplicação de emulsão por bicos externos.

A legenda inferior mostra o critério de fim de vida da broca.

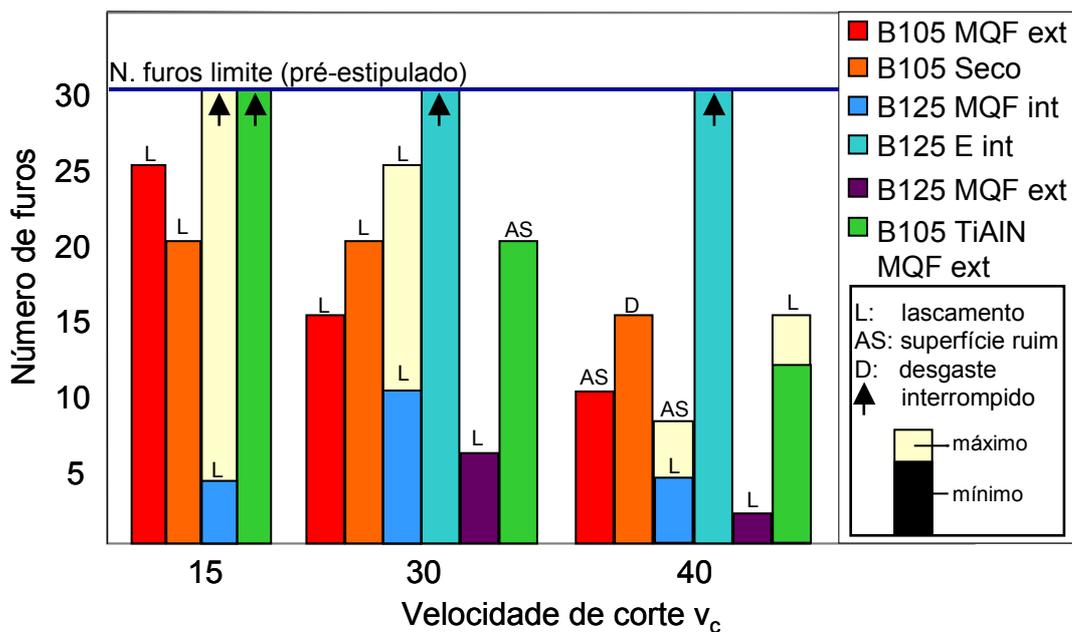


Figura 5. 11 – Comportamento da vida da ferramenta para diferentes condições de aplicação de fluido lubri-refrigerante

Os resultados obtidos mostram que a condição de aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta apresentou os melhores resultados. Para esta condição, todas as ferramentas testadas executaram 30 furos. Este número de furos limite foi estipulado com base nas informações obtidas das empresas parceiras, sendo indicado como um número mínimo adequado para a averiguação do comportamento de desgaste e da vida da broca. Após a execução de 30 furos foi possível uma caracterização satisfatória dos problemas ocorridos na ferramenta e também da superfície do furo. Para a condição de aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta (E int), não foram realizados ensaios para a velocidade de corte de 15 m/min, pois atualmente é usual o emprego de uma velocidade de corte de 30 a 40 m/min, não sendo assim justificável uma redução a faixas inferiores a 30 m/min.

Para os ensaios com MQF aplicado pelo interior da ferramenta, os resultados foram os segundos melhores obtidos. No entanto, para esta condição apresentaram-se as maiores dispersões do número de furos executados. Para a velocidade de corte de 15 m/min, o número mínimo de furos executados foi 5 e o máximo foi 30 (sendo para esta condição o ensaio interrompido). A explicação encontrada para esta dispersão encontra-se na ferramenta, broca do tipo 125. Para uma broca do tipo 125 nova, o arredondamento da quina foi medido em 19 μm , enquanto que para as demais brocas, o valor médio do arredondamento da quina permaneceu em 32 μm . Com um menor raio, tem-se uma ponta menos robusta e com as tensões residuais mais concentradas na extremidade do gume, estando este mais suscetível ao lascamento. Apesar de a broca do tipo 125 ter sofrido um processo de micro-polimento em seus gumes e quinas, objetivando eliminar as tensões residuais do processo de retificação, ficou assim provado que não houve o efeito esperado para parte das brocas. Por isso, a dispersão dos resultados foi tão grande.

Para a furação a seco e com aplicação de MQF por bicos externos com a broca do tipo 105 não revestida, os resultados mostraram boa repetibilidade. O número de furos diminuiu com o aumento da velocidade de corte.

Os resultados mais insatisfatórios foram os realizados com MQF aplicado por bicos externos para as ferramentas modificadas para a aplicação de MQF pelo interior da ferramenta (broca do tipo 125). A explicação também está na geometria da broca

que apresenta um gume mais afiado e um menor arredondamento da quina, que propicia o lascamento.

Como mencionado anteriormente, na furação com MQF aplicado por bicos externos foi observado uma grande quantidade de aderência de material sobre os gumes e sobre as guias da broca. A figura 5.12 mostra em detalhes a aderência formada no gume e nas guias durante os ensaios com brocas do tipo 105, com (TiAlN) e sem revestimento, para as velocidades de corte de 15 e 40 m/min.

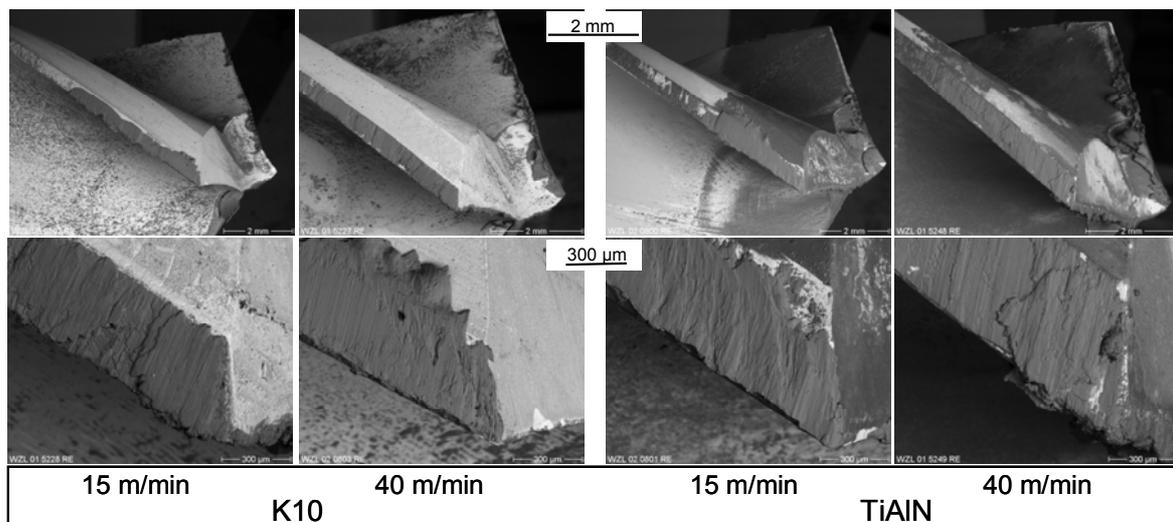
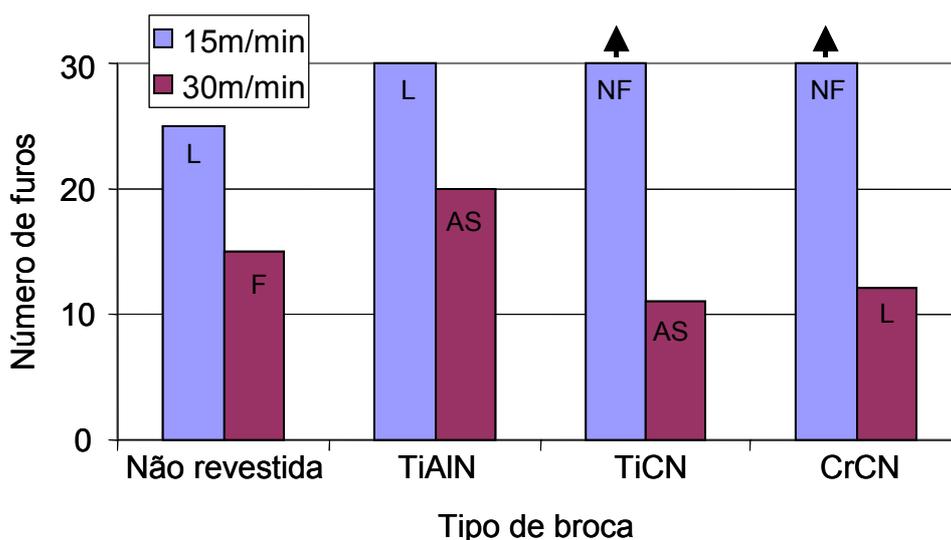


Figura 5. 12 – Detalhes da aderência em ferramentas de metal-duro K10, sem e com revestimento de TiAlN, observada nos ensaios com MQF aplicado por bicos externos

É possível visualizar a grande quantidade de aderências formadas sobre o gume e as guias da broca na usinagem com aplicação de MQF por bicos externos. Percebe-se também que não existe uma redução desta aderência para as diferentes velocidades de corte, ou até mesmo com a adoção de um revestimento de TiAlN. Esta aderência também formou-se em semelhante intensidade para os revestimentos de TiCN e de CrCN. O emprego de MQF aplicado pelo interior da ferramenta evidenciou uma redução significativa da aderência de material. Esta redução pode ser explicada pela formação de um pequeno filme de óleo lubrificante que, a partir de uma certa profundidade de corte, é formada apenas sob a utilização de MQF aplicado pelo interior da ferramenta. Com isso, para estas condições testadas, os revestimentos não se mostraram eficientes para a redução da aderência formada sobre a face, o gume e as guias da ferramenta de corte.

Conforme alguns pesquisadores [37, 46, 57, 61, 62, 85], a otimização da geometria e da constituição do material da broca é fundamental para a obtenção de resultados satisfatórios com o emprego de MQF. Resultados positivos também são obtidos com a utilização de revestimentos que visam a redução de atrito e temperatura, conforme literatura [46, 63 - 84].

Em decorrência da ausência do filme lubrificante de óleo em profundidades maiores que uma vez o diâmetro, para a aplicação de MQF com bicos externos, procurou-se minimizar os efeitos relacionados com o atrito e as elevadas temperaturas de corte com a utilização de diferentes revestimentos. A figura 5.13 mostra a vida das ferramentas e o seu respectivo critério de fim de vida para a broca de metal-duro K10, sem e com os revestimentos de TiAlN, de TiCN e de CrCN, para as velocidades de corte de 15 e 30 m/min.



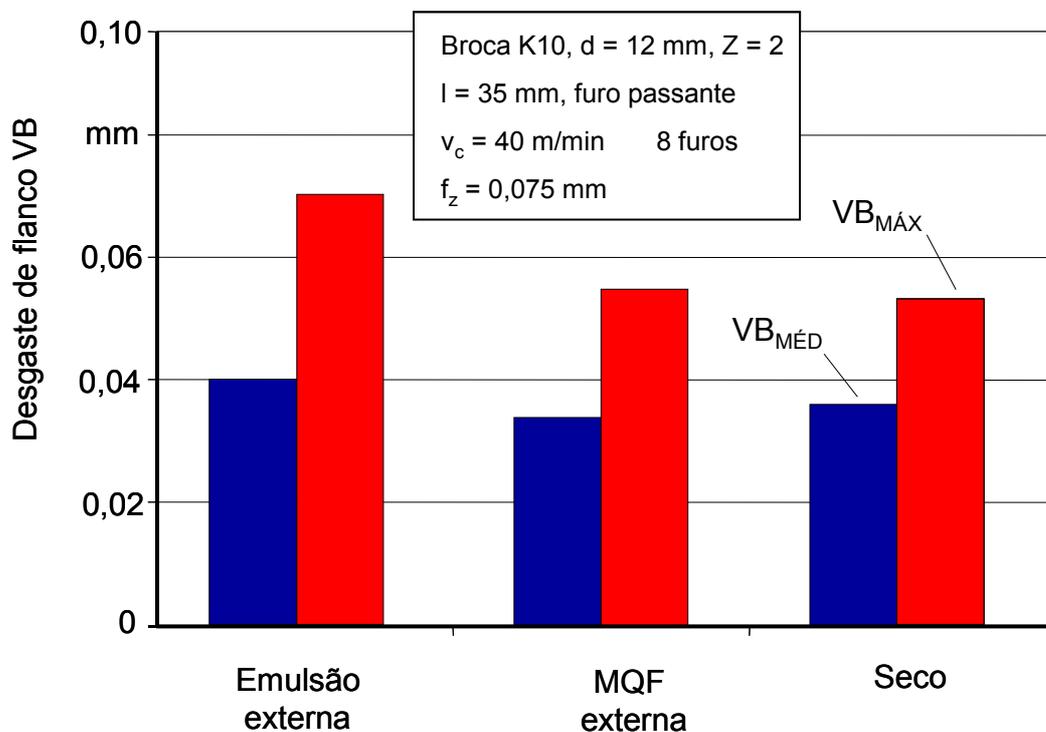
(L: Lascamento; F: Fratura; NF: Número de furos limite; AS: superfície ruim)

Figura 5. 13 – Vida da broca para diferentes revestimentos, com MQF aplicado com bicos externos

Para a velocidade de corte de 15 m/min, em relação à broca não-revestida, observa-se um ligeiro aumento no número máximo de furos obtidos para a broca com revestimento de TiAlN. Os revestimentos de TiCN e de CrCN foram interrompidos em 30 furos. No entanto, para a velocidade de corte de 30 m/min, tanto para as brocas não revestidas, como também as brocas revestidas, observa-se um elevado índice de lascamentos, já para um número pequeno de furos realizados, ou a qualidade da superfície usinada passa a apresentar irregularidades oriundas do caldeamento e

adesões. Principalmente os revestimentos de TiCN e CrCN deixaram a desejar. Isto mostra que os revestimentos conseguem garantir a furação para baixas velocidades de corte, mesmo não havendo mais o efeito da lubrificação MQF para profundidades maiores que o diâmetro das brocas. No entanto, já para a velocidade de corte de 30 m/min, o efeito do revestimento não supre a falta de lubrificante no processo.

Ensaio comparativos realizados com brocas não-revestidas, substrato K10, de diâmetro de 12 mm, disponíveis no mercado, apresentaram interessantes resultados. Os ensaios foram realizados com as seguintes formas de aplicação de fluido: com MQF aplicado pelo exterior da ferramenta, com emulsão aplicada por bicos externos e a seco. Após o oitavo furo, foram medidos maiores desgastes para a ferramenta



com aplicação de emulsão por bicos externos, figura 5.14.

Figura 5. 14 – Desgaste da broca para diferentes condições de aplicação de fluido

O maior desgaste apresentado para a condição de emulsão aplicada por bicos externos, após a execução de oito furos, pode ser explicado pelo choque térmico acentuado, da mudança brusca da temperatura da broca na saída do furo passante, quando ela entra em contato com o fluido, aplicado em abundância. Devido à diminuição rápida da temperatura na superfície da broca, surgem tensões de tração que

podem ultrapassar o limite de resistência do material e enfraquecer o gume. A cada furo estes defeitos aumentam, caracterizando uma falha por fadiga térmica.

Para ensaios realizados com os mesmos parâmetros anteriores, porém utilizando brocas revestidas com uma camada de TiN, a diferença apresentada pelas condições de aplicação de fluido foi ainda maior. Para a aplicação de MQF com bicos externos, figura 5.15, os resultados foram sensivelmente melhores que os obtidos com emulsão aplicada por bicos externos e a seco.

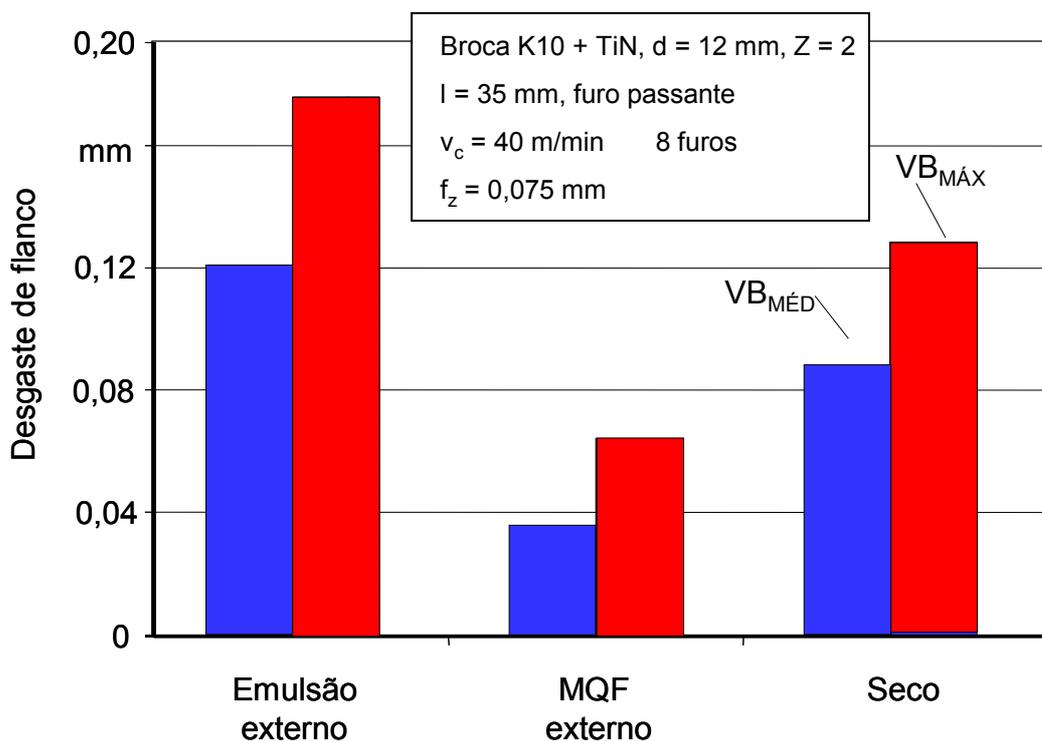


Figura 5. 15 – Desgaste da broca revestida para diferentes formas de aplicação de fluidos e para a furação a seco

Com o objetivo de diminuir os custos de furação foi avaliada a possibilidade de empregar brocas com ponta de metal-duro intercambiável. Em ensaios empregando esta broca de ponta intercambiável com revestimento de TiAlN, para as mesmas condições dos dois ensaios anteriormente apresentados, os resultados não foram satisfatórios. O número máximo de furos executados foram dois furos. O fim de vida para estes ensaios foi o péssimo acabamento superficial e o lascamento dos gumes. A péssima qualidade da superfície usinada pôde ser visualmente comprovada, com uma grande quantidade de material caldeado sobre a superfície do furo. A figu-

ra 5.16 mostra detalhes da broca com inserto inter-cambiáveis testada com emulsão aplicada por bicos externos.

As brocas empregadas no desenvolvimento dos ensaios, cujos resultados estão apresentados nas figuras 5.14 e 5.15, eram ferramentas indicadas para a usinagem de ligas de titânio, por outros fabricantes, e disponíveis no mercado. A broca apresentada na figura 5.16 também é disponível no mercado, entretanto esta é recomendada para aplicações genéricas, não especificamente para a furação de ligas de titânio. As brocas empregadas não possuem qualquer modificação voltada para a adequação de condições de aplicação de MQF.

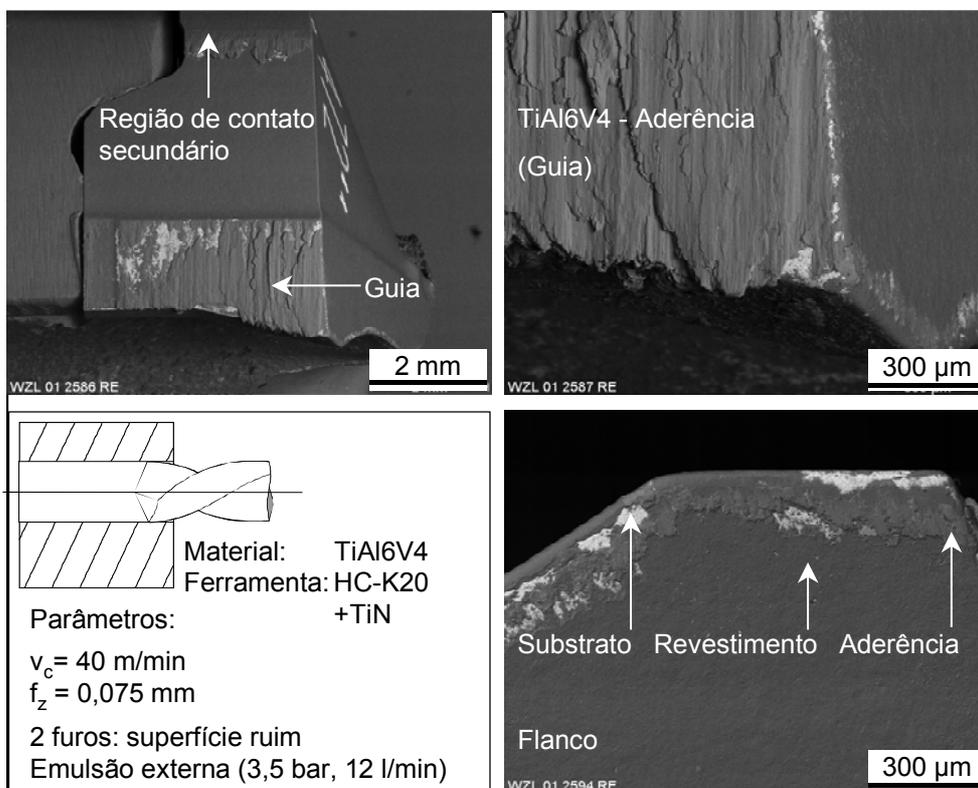


Figura 5. 16 – Detalhes da face e das guias da ponta de metal-duro inter-cambiável com aplicação de emulsão por bicos externos

A figura 5.16 mostra em detalhes a guia e a face de uma ponta de metal-duro inter-cambiável empregada na furação de titânio. A grande largura das guias desta broca de ponta intercambiável ocasionou um super aquecimento e, conseqüentemente, levou a ferramenta a falha prematura. Após o primeiro furo, parte do revestimento de TiAlN já havia sido removido e o substrato estava exposto. O contato da broca com a parede do furo também se apresentou como problemático nestes ensaios,

levando a extrusão de material entre as guias e a superfície do furo. As forças de avanço apresentaram valores elevados, ultrapassando o limite estipulado pelos equipamentos de medição de forças.

Alterando a aplicação de fluido de corte de emulsão aplicada em abundância por MQF aplicado pelo interior da ferramenta, pode-se observar a redução de aderência de material na guia da broca do tipo 125 e o melhor tipo de cavaco, figura 5.17.

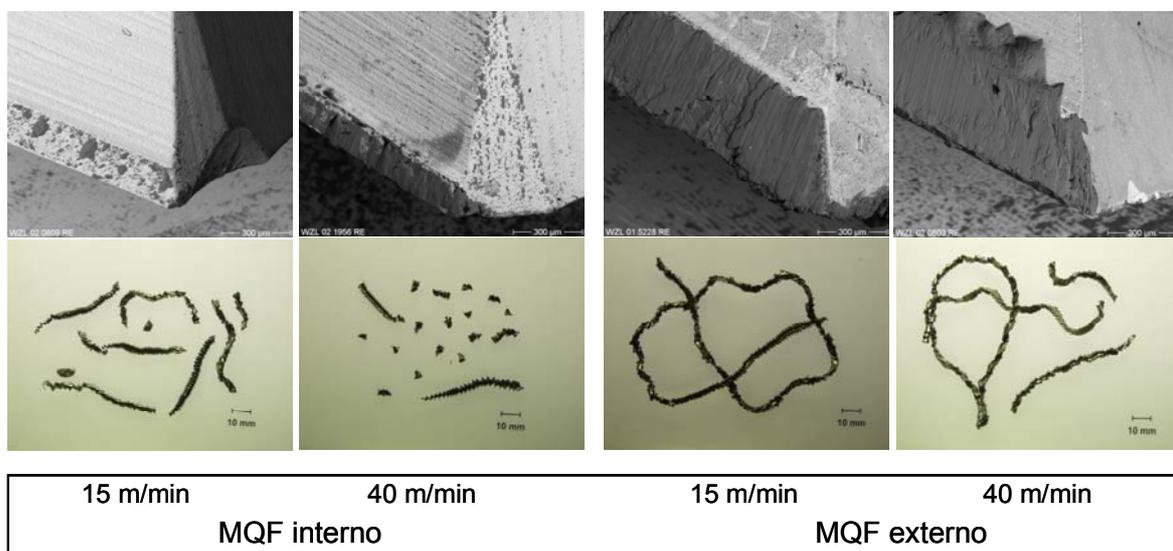


Figura 5. 17 – Detalhes da quina da broca e do cavaco obtido para as diferentes formas de aplicação de MQF, pelo interior e com bicos externos à ferramenta

No atrito entre a parede do furo usinado e a broca, a lubrificação entre ferramenta e material da peça é garantida pelo lubrificante que adere à parede do furo. Apenas uma quantidade mínima de lubrificante consegue entrar na interface ferramenta / parede do furo, de forma que com o aumento do percurso deslocado do ponto genérico da parede do furo sobre a guia, as propriedades do lubrificante vão se perdendo (devido ao aumento da temperatura, perda da viscosidade e até a vaporização do fluido de corte) e a partir de um certo ponto passa-se a atrito seco e iniciam-se processos de desgaste por aderências.

Para avaliar o efeito do atrito das brocas sobre a parede do furo usinado, foram preparadas ferramentas com largura reduzida das guias, figura 5.18, baseado nos re-

sultados positivos obtidos na furação de materiais menos críticos que as ligas de titânio, mas com mínimas quantidades de fluido de corte [62].

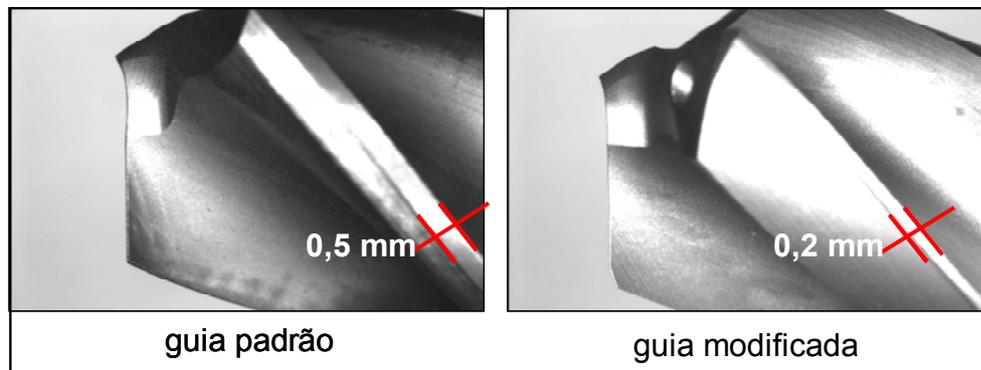


Figura 5. 18 – Detalhe da guia com largura reduzida

Reduzindo a largura da guia para 40% do valor usual (padrão), obteve-se um resultado mais favorável, já com pequenas quantidade de fluido de corte [47].

Para melhorar a condição de atrito na interface guia da broca e a parede do furo deve-se garantir uma melhor lubrificação nesta região. Procurou-se obter um aumento da quantidade de fluido de corte na interface da guia e parede do furo, adequando a geometria da quina e do gume secundário, através de um pequeno chanfro ou arredondamento, figura 5.19.

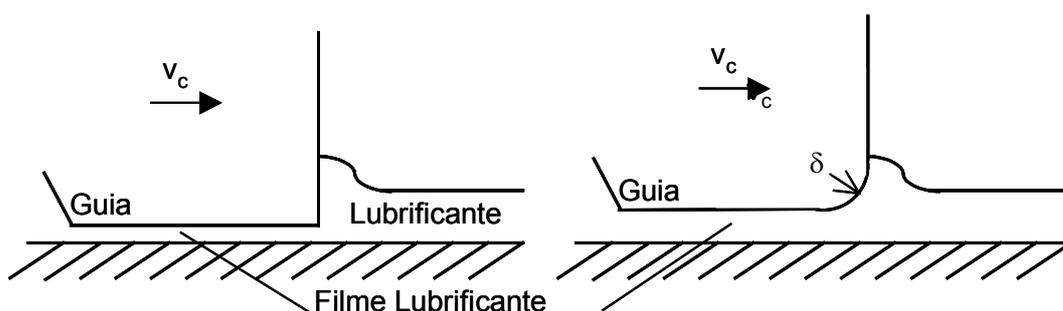


Figura 5. 19 – Lubrificação hidrodinâmica na interface guia / parede do furo

A figura 5.20 mostra algumas das modificações realizadas em brocas para a furação de Ti6Al4V com MQF aplicado pelo interior da ferramenta. As fotografias C e D são

referentes à broca do tipo 284 modificada. A fotografia F mostra a broca do tipo 25 modificada.

As fotografias A e B e a fotografia E são referentes às brocas usualmente encontradas no mercado do tipo 284 e 25, respectivamente.

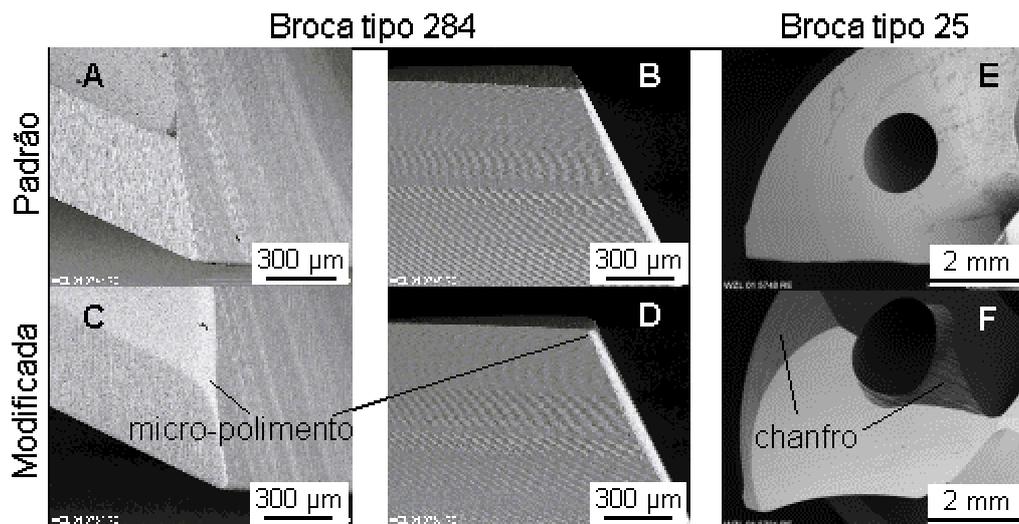


Figura 5. 20 – Detalhes das modificações das brocas do tipo 284 e 25, empregadas com MQF aplicado pelo interior da ferramenta

Os ensaios comparativos realizados com as brocas modificadas (fotografias inferiores, C, D e F) e as padrões (fotografias superiores, A, B e E), mostradas na figura 5.20, apresentaram uma diferença significativa dos resultados.

Para a broca do tipo 284, com um micro-polimento realizado na região de interface entre a guia e o gume, houve um aumento da vida da broca em quase três vezes. O objetivo do micro-polimento foi eliminar os cantos vivos, reduzindo a tensão resultante da retificação da broca, bem como propiciar um efeito de lubrificação hidrodinâmica, como mostrado esquematicamente na figura 5.19. Na ferramenta não modificada, o critério de fim de vida foi o surgimento de micro-lascamentos nos cantos vivos, na região entre o gume e a guia. A figura 5.21 mostra ambas as brocas, do tipo 284, após o desenvolvimento dos ensaios.

Para a broca padrão, o final de vida foi atingido após a execução de 30 furos. Para esta broca, o registro de pequenos lascamentos na quina da ferramenta foi o critério de final de vida.

Para a broca modificada, o final de vida foi atingido após a usinagem de 80 furos. Para esta broca, a formação de lascamentos nas guias, na proximidade da quina da ferramenta, também foi o critério de final de vida.

Para a broca do tipo 25, o efeito da lubrificação hidrodinâmica foi mais claro. O chanfro entre o flanco principal e o flanco secundário propiciou a melhor penetração do lubrificante, já para mínimas quantidades de fluido de corte. A maior abertura do furo de refrigeração na extremidade de saída permitiu uma melhor distribuição do lubrificante entre o flanco e o gume transversal da broca, resultando numa redução da temperatura. Com esta ferramenta modificada, o número de furos realizados aumentou quase quatro vezes.

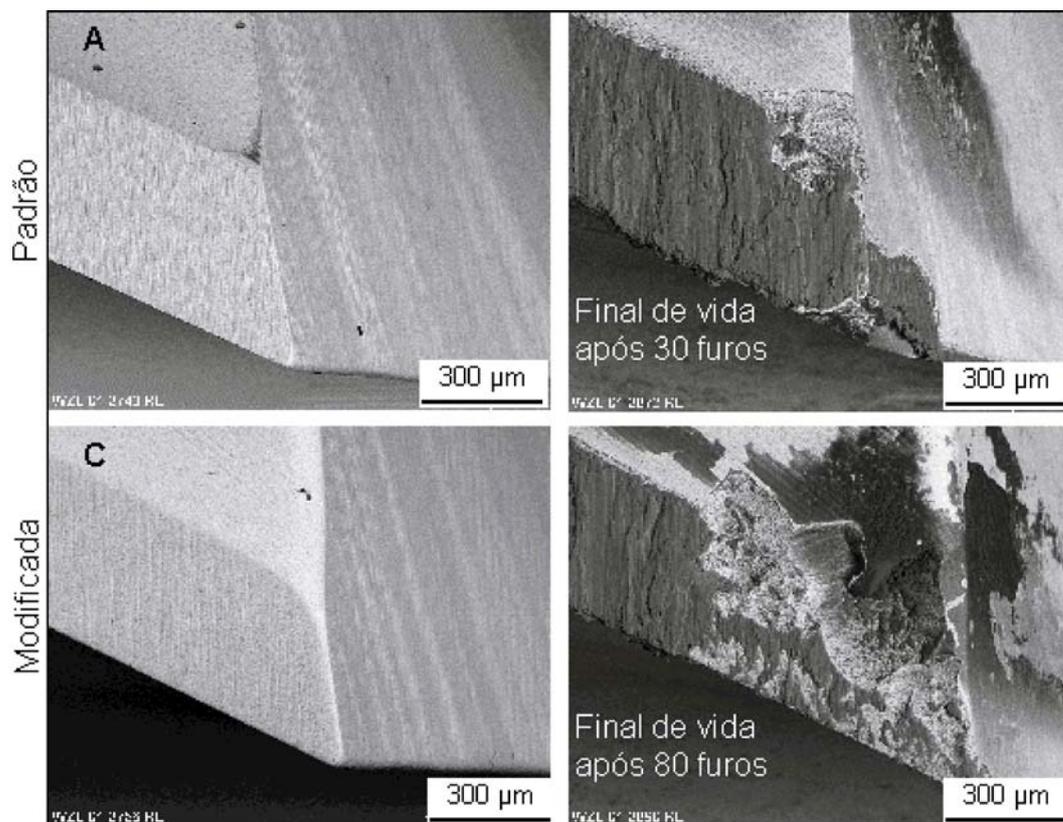


Figura 5. 21 – Detalhes das brocas do tipo 284, modificada e padrão, após os ensaios com MQF aplicado pelo interior da ferramenta

Os usuários de ligas de titânio e a literatura técnica [4, 14, 20, 28, 32 e 62] recomendam para a furação, com condições usuais de aplicação de fluido lubri-refrigerante, gumes bem afiados. Entretanto, os resultados obtidos com brocas que possuem gume com afiação muito acentuada podem apresentar problemas de fragilização da quina e do gume. Esta fragilização, somada as elevadas solicitações térmicas apresentadas em processo com aplicação de MQF, podem propiciar a formação de lascamentos no gume da ferramenta.

Com o intuito de reduzir as solicitações térmicas no gume, realizaram-se ensaios com avanço intermitente [86], com o objetivo de verificar uma eventual melhora na vida da broca e uma melhora na quebra do cavaco, resultados estes obtidos na furação do aço inoxidável [86].

A figura 5.22 mostra o comportamento da vida da broca do tipo 125 para diferentes condições de aplicação de fluido lubri-refrigerante e com avanço intermitente.

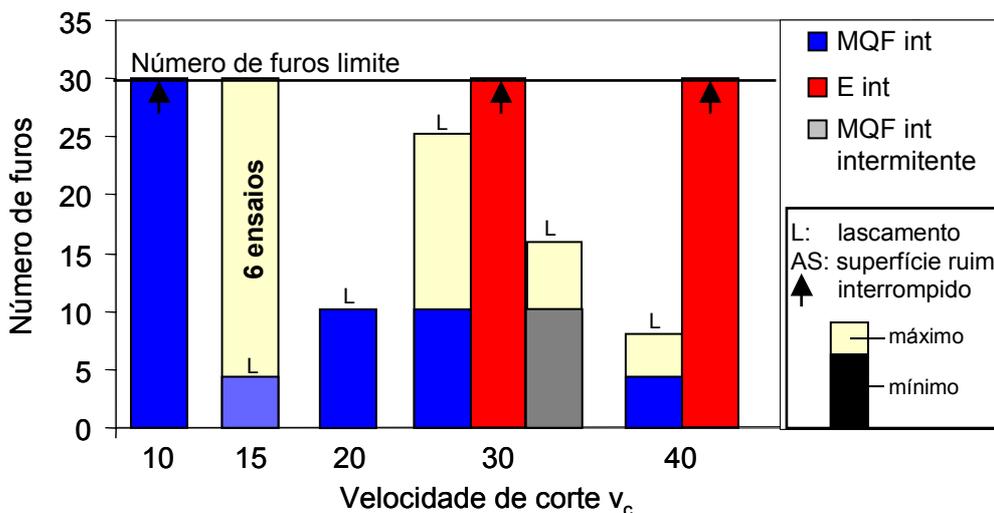


Figura 5. 22 – Comportamento da vida da broca do tipo 125 na furação para diferentes condições de aplicação de fluido lubri-refrigerante e com avanço intermitente

Para todos os ensaios para a condição de aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta, os resultados apresentaram-se sensivelmente superiores às demais condições, como mostrado anteriormente. Para a condição de aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta, em todos os ensaios as brocas executaram o número de fu-

ros limite (30 furos) sem atingir um critério de fim de vida, sendo o desgaste de flanco máximo ($VB_{\text{máx}}$) inferior a 100 μm .

Para a aplicação de MQF pelo interior da ferramenta, a dispersão dos resultados foi ampla. Para a velocidade de corte de 10 m/min todas as brocas atingiram o número de furos limite (30), entretanto, para a velocidade de corte de 15 m/min, a dispersão chegou a 85%. O lascamento das quinas das brocas foi o critério de fim de vida para os 6 ensaios realizados para esta condição. Para velocidades de corte de 20, 30 e 40 m/min, o critério predominante também foi o lascamento da broca, como visto anteriormente na figura 5.10. A explicação destes resultados é embasada pela redução da dureza da ponta da broca do tipo 125 para condições que propiciam maiores temperaturas na região de corte. O grau de afiação da broca 125 é acentuado e esta broca possui um menor arredondamento do raio do gume e um menor raio de quina, em relação às demais brocas testadas. A execução de um chanfro arredondado na broca do tipo 25 (figura 5.20, F) eliminou o problema de lascamento na quina da broca.

Para minimizar a solicitação térmica da broca foi efetuada a furação com ciclos de avanço intermitente, sugeridos por BORK [86] para a furação de aço inoxidável austenítico. Na furação da liga de titânio Ti6Al4V, o avanço intermitente não apresentou as vantagens obtidas na furação do aço inoxidável. Nestes ensaios com a liga de titânio foram avaliadas alterações no tempo de pausa (0,01 até 0,1 s) e na profundidade de avanço para a realização da pausa (0,5; 1 e 2 mm), para uma velocidade de corte de 30 m/min. Para todos os ensaios realizados, as vidas obtidas foram iguais ou inferiores às obtidas com a condição de avanço contínuo. Acredita-se que o pior resultado esteja associado ao aumento do tempo de atrito sem corte entre a ferramenta e a peça, para os intervalos do tempo de pausa ensaiados. Este aumento do tempo de atrito gerou uma maior temperatura de contato. Como o titânio possui uma baixa condutividade térmica (tabela 4.1) [87], a temperatura e os gradientes de temperatura aumentam, levando a maiores tensões térmicas, possibilitando assim os pequenos lascamentos na região central da broca. A figura 5.23 mostra lascamentos no gume transversal da broca empregada para o corte com avanço intermitente. Por outro lado, com um rompimento dos cavacos mais efetivo,

o emprego de avanço intermitente apresentou uma melhora significativa no transporte dos cavacos para fora dos furos.

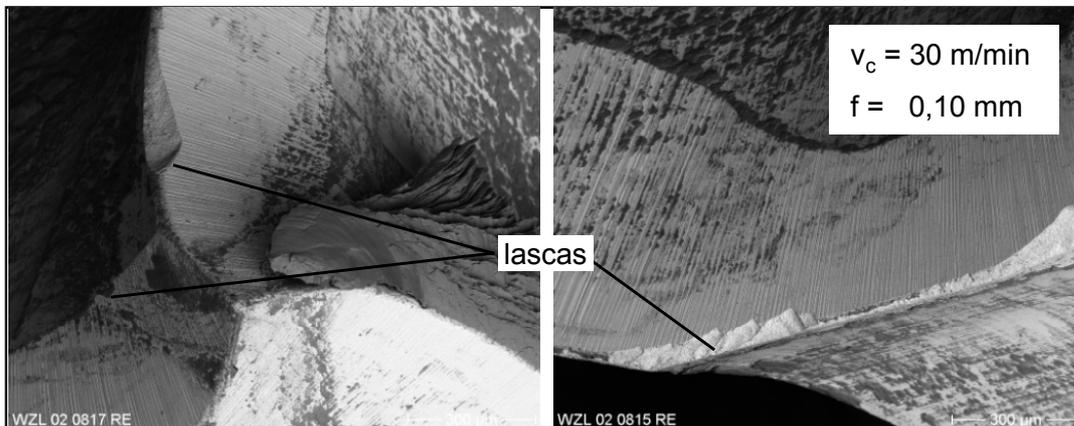


Figura 5. 23 – Detalhe dos lascamentos típicos obtidos no gume transversal da broca na furação utilizando a metodologia do avanço intermitente

Os resultados mostram que este tipo de metodologia de furação não é apropriado para a usinagem de titânio, uma vez que com avanços contínuos, usualmente empregados, tem-se um melhor desempenho e um menor tempo de usinagem do furo.

Para elucidar o motivo das falhas das ferramentas na furação da liga de titânio Ti6Al4V buscaram-se informações nas características do processo de furação para as diversas brocas em análise. Particular ênfase foi dada à análise das forças de usinagem, sua distribuição ao longo do gume e à temperatura na peça e na broca.

b) Esforços mecânicos

Para a avaliação dos esforços mecânicos foram medidas as grandezas da força de avanço F_f e do momento torçor M_t [2, 4, 46]. Objetivando o melhor conhecimento do comportamento destas para as diferentes situações de aplicação de fluidos lubri-refrigerante, foram também analisadas a distribuição dos esforços ao longo da parcela cortante do gume principal e obtidas informações sobre a força de corte F_c e sobre a força passiva F_p .

Inicialmente as grandezas F_f e M_t foram avaliadas para as condições usualmente empregadas na indústria. Os parâmetros de corte adotados foram: velocidade de corte v_c de 30 e 40 m/min e um avanço $f = 0,10$ mm, com aplicação abundante de fluido lubri-refrigerante pelo interior da ferramenta.

Para esta situação o comportamento típico da força de avanço e do momento torçor, figura 5.24, mostra um aspecto de regularidade das forças ao longo da evolução do furo, desprezando-se a entrada e a saída da ferramenta. Na condição de entrada da ferramenta, tem-se uma seção de corte variável, levando a um aumento quase linear da força de avanço e do momento torçor. Em decorrência da manutenção da temperatura da peça pela refrigeração abundante, os esforços de usinagem praticamente permanecem inalterados ao longo de todo o percurso usinado.

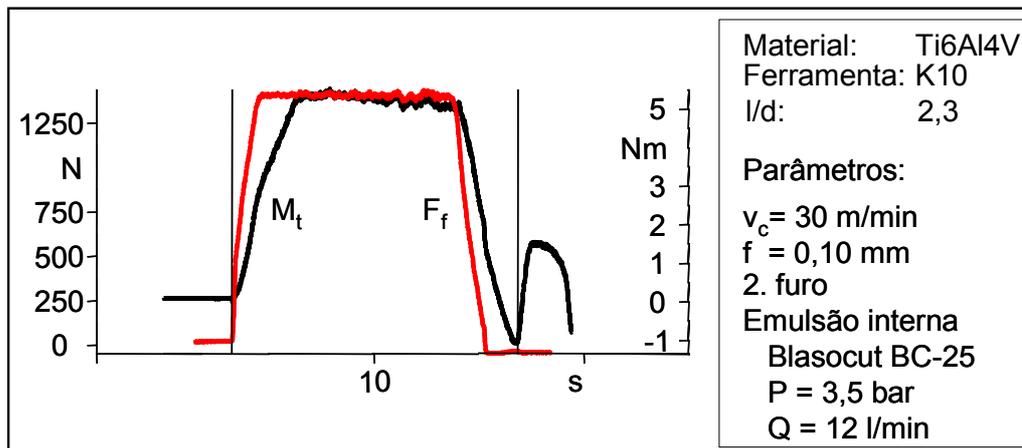


Figura 5. 24 – Comportamento da força de avanço F_f e do momento torçor M_t para a condição de emulsão aplicada pelo interior da ferramenta

Para o mesmo tipo de broca (broca do tipo 125) e mantendo os parâmetros de usinagem, tem-se um comportamento diferente para a condição de aplicação de MQF por bicos externos, figura 5.25.

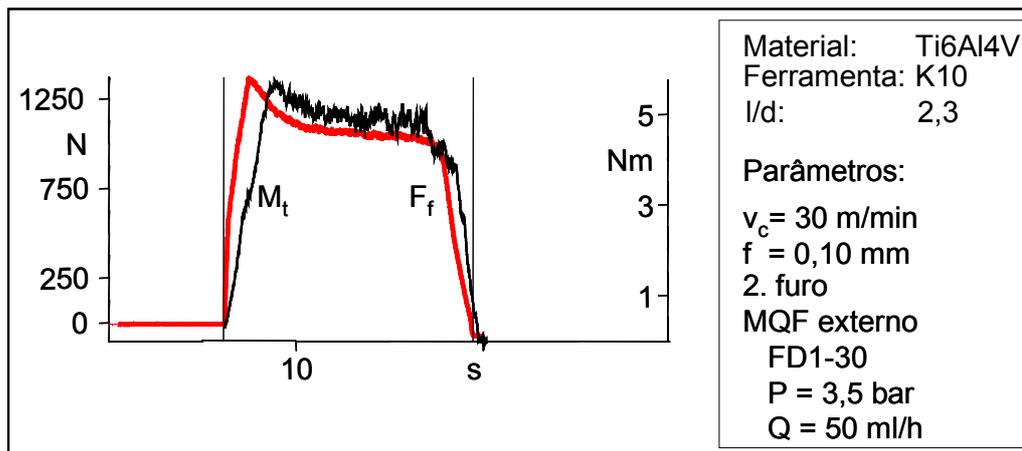


Figura 5. 25 – Comportamento da força de avanço F_f e do momento torçor M_t para a condição de MQF aplicado com bicos externos

No início da usinagem do furo o material da peça encontra-se frio e o comportamento da evolução da força e do momento são semelhantes as da furação com fluido em abundância. À medida que a furação progride, a capacidade de refrigeração da mínima quantidade de fluido de corte aplicado não garante mais a manutenção da temperatura, nem da peça, nem da ferramenta e explica-se a diminuição dos esforços de usinagem pelo aumento da temperatura e respectiva diminuição da resistência do material da peça, figura 5.26.

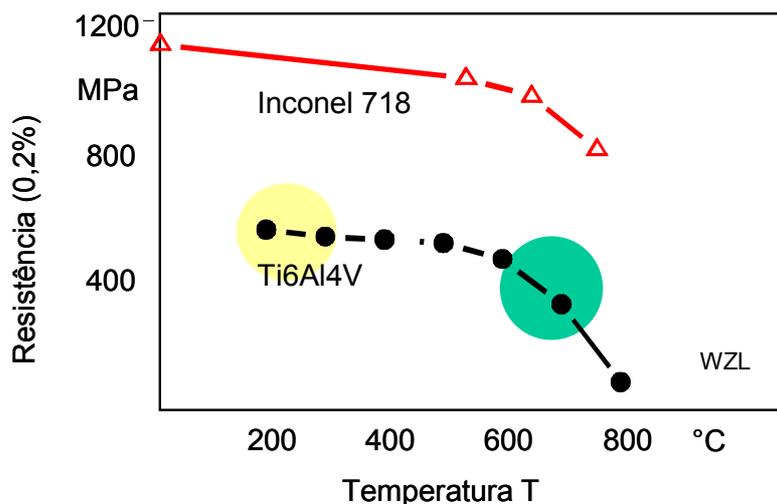


Figura 5. 26 – Gráfico de resistência mecânica da liga de titânio Ti6Al4V e da liga de níquel Inconel 718 em função da variação da temperatura [27]

Aplicando-se MQF pelo interior da ferramenta, o comportamento da força de avanço F_f e do momento torçor M_t não apresentaram uma tendência clara e definida em relação aos outros ensaios. Na maioria dos casos as curvas apresentam o comportamento mostrado na figura 5.27.

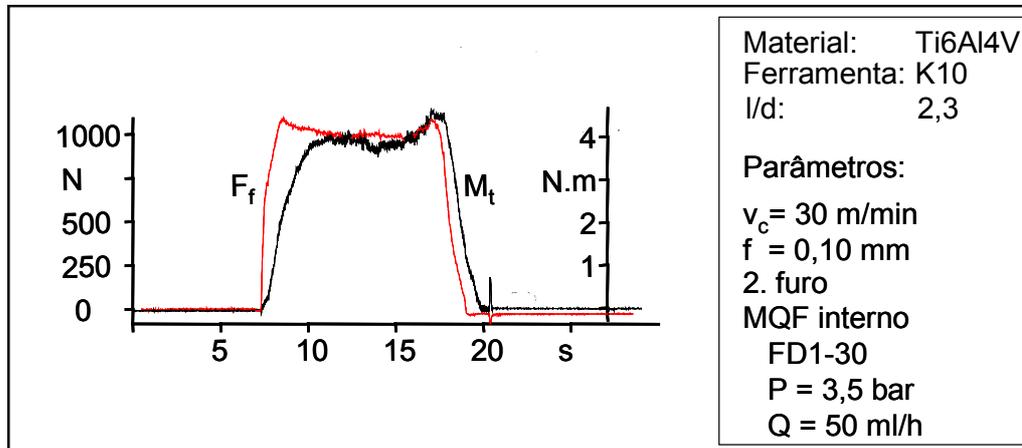


Figura 5. 27 – Comportamento da força de avanço F_f e do momento torçor M_t para a condição de MQF aplicado pelo interior da ferramenta

Inicialmente observa-se uma diminuição dos esforços, porém a partir de uma profundidade de aproximadamente $1,5 \times d$, tanto o momento como também a força de avanço tendem a aumentar.

Para esta condição, o aumento do momento torçor pode ser explicado pelo aumento do atrito na região de corte para maiores profundidades. Para pequenas profundidades, o micro-filme de lubrificante ainda é suficiente para diminuir o atrito, reduzindo assim o momento torçor. À medida que a profundidade de furação aumenta, aumenta o atrito e o momento torçor.

Para entender a relação entre forças, temperaturas e avanço, variou-se tanto a velocidade de corte, como também o avanço de furação. Um aumento da velocidade de corte proporciona um sensível aumento da temperatura na raiz do cavaco, mas levando apenas a uma pequena diminuição da força de avanço e também do momento torçor, figura 5.28.

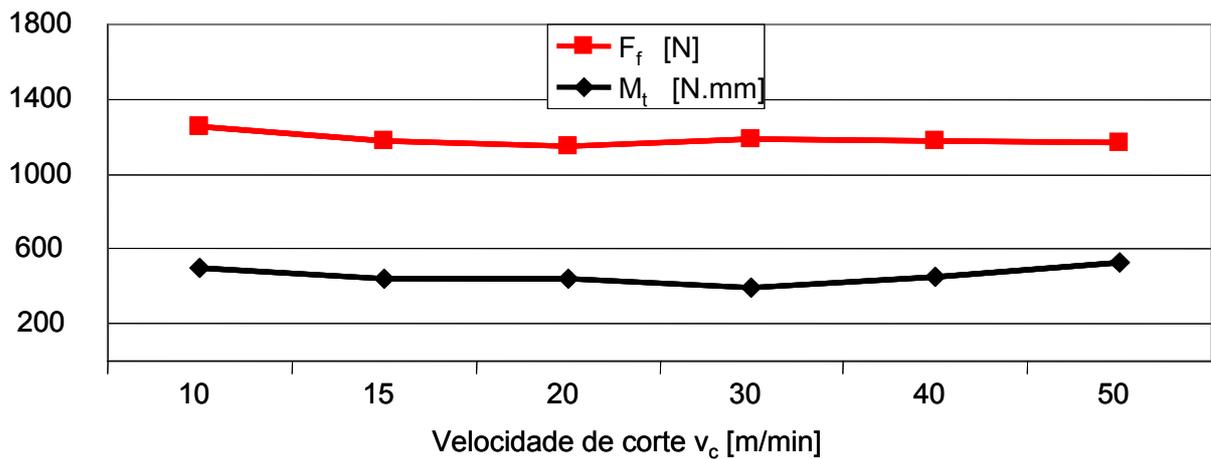


Figura 5. 28 – Força de avanço e momento torçor em função da velocidade de corte

Já o aumento do avanço apresenta um comportamento esperado, figura 5.29 [2, 4].

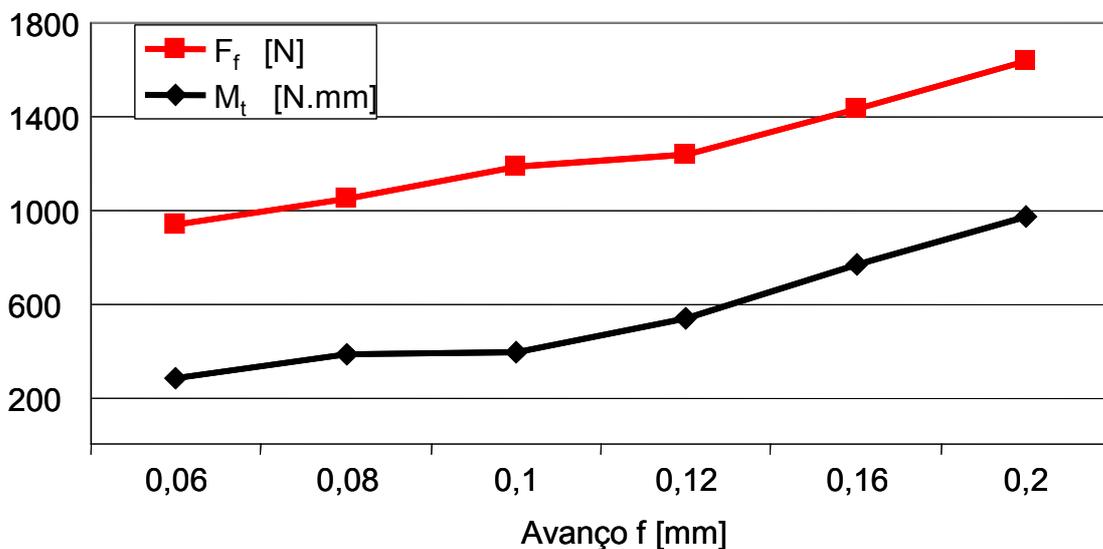


Figura 5. 29 – Força de avanço e momento torçor ao longo da evolução do aumento do avanço

Para averiguar se um aumento no atrito entre a parede do furo e as guias da broca leva também a um aumento dos esforços foram efetuados furos com uma relação l/d de 3,5. O resultado mostra que efetivamente para profundidades maiores que $1,5 \times d$ o atrito na parede do furo tem uma influência significativa sobre o comportamento da força de avanço e o momento torçor, figura 5.30.

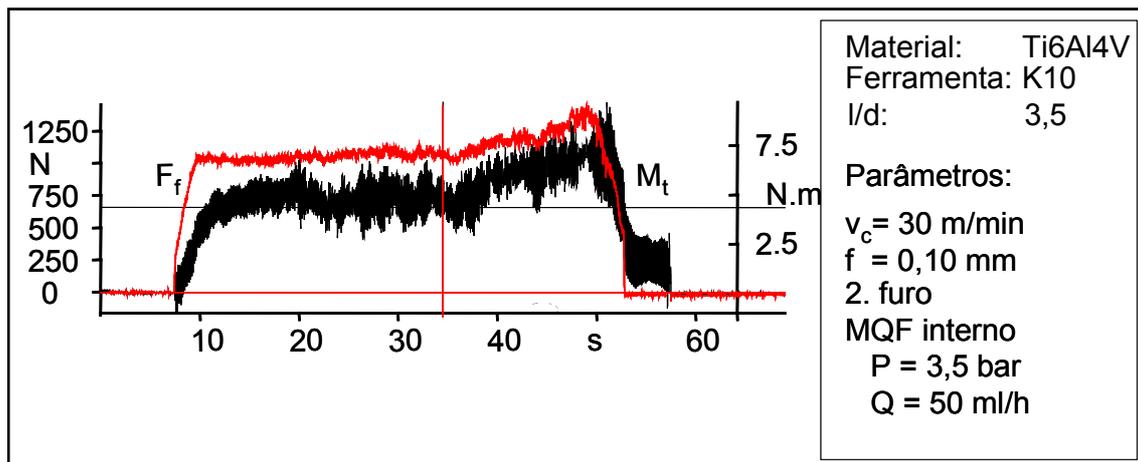


Figura 5. 30 – Comportamento da força de avanço F_f e do momento torçor M_t para aplicação de MQF pelo interior da broca, com maiores taxas de profundidade

Este comportamento também foi observado para a liga de aço inoxidável X5CrNiCuNb17-4-4.

O gráfico de barras da figura 5.31 resume os resultados das forças e momentos observados na furação de titânio e mostra que processos com menor lubri-refrigeração apresentam valores mais baixos tanto de força de avanço como de momento torçor, quando comparado com a furação com quantidades abundantes de fluidos de corte.

Os valores mais altos de força de avanço, para a aplicação de emulsão e MQF aplicado por bicos externos e a seco, podem ser explicados pelas componentes de lubrificação e amolecimento do material, junto com o desgaste / avaria da ferramenta de corte.

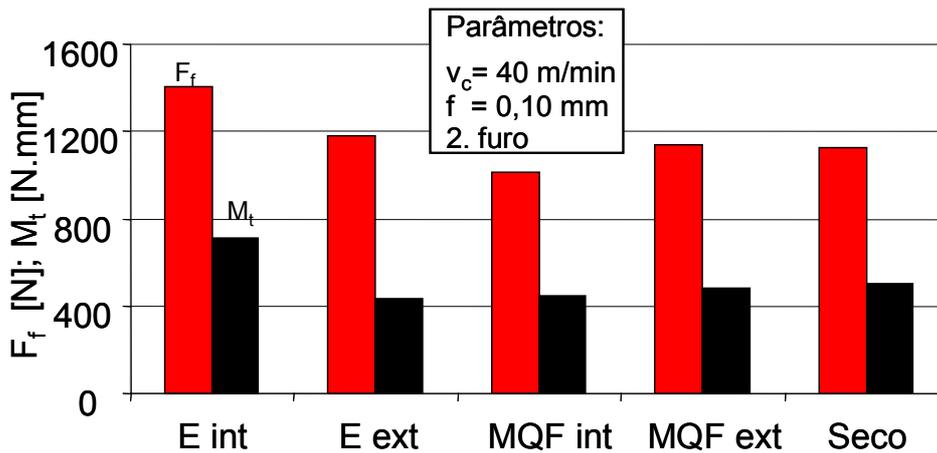


Figura 5. 31 – Comportamento da força de avanço F_f e do momento torçor M_t para diferentes condições de aplicação de fluido lubri-refrigerante

No gráfico são verificados os maiores valores de força de avanço F_f e momento torçor M_t para a condição de emulsão aplicada pelo interior da ferramenta, onde se acredita ocorrer as menores temperaturas. Este resultado comprova a influência da temperatura sobre as grandezas mecânicas do processo. Este comportamento de maiores esforços para a condição de aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta foi verificado para todas as variações de parâmetros de corte testadas nos experimentos desenvolvidos.

Para as demais condições de aplicação de fluido e a seco, os resultados não apresentaram uma diferença significativa, sendo apenas verificada uma ligeira redução do valor médio da força de avanço para a condição de aplicação de MQF pelo interior da ferramenta para uma velocidade de corte de 40 m/min. No entanto, esta situação não se repetiu para todos os parâmetros de corte ensaiados.

Na figura 5.32 são apresentados a força de avanço e o momento torçor para a broca do tipo 105 não-revestida e com diferentes revestimentos, para as velocidades de corte de 15 e 30 m/min. Para esta broca os ensaios foram realizados com MQF aplicado por bicos externos.

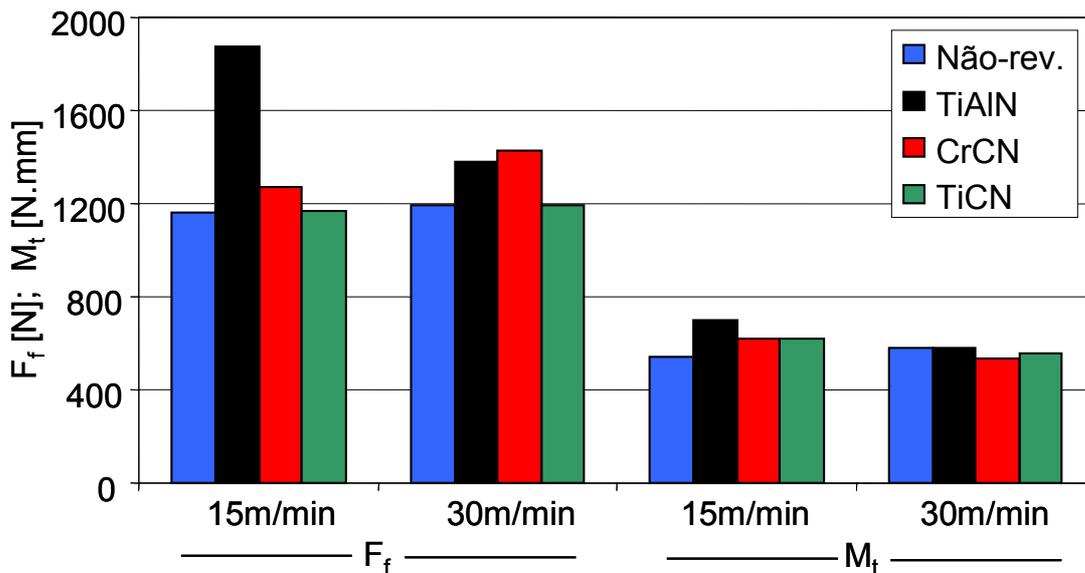


Figura 5. 32 – Comportamento da força de avanço e do momento torçor para a furação com uma broca do tipo 105 com diferentes revestimentos

A força de avanço registrada para as diferentes velocidades de corte apresentou um valor médio semelhante para as brocas não-revestidas e para as brocas revestidas com TiCN. Para as brocas revestidas com TiAlN e com CrCN, os valores médios foram ligeiramente superiores aos demais, sendo que para uma velocidade de corte de 15 m/min, a broca revestida com TiAlN apresentou uma força de avanço aproximadamente 40% superior às demais brocas. As diferenças aqui encontradas podem estar relacionadas com as variações de temperatura atingidas durante o corte, influenciadas diretamente pelos diferentes revestimentos e suas características.

O momento torçor apresentou um valor ligeiramente superior ao valor medido para a broca revestida com o TiAlN, para a velocidade de corte de 15 m/min. Para as demais ferramentas não foram verificadas diferenças significativas.

Para uma melhor compreensão do comportamento dos esforços de usinagem, foi avaliada a influência do atrito das guias, analisados os esforços em diferentes regiões da broca e a decomposição dos esforços de usinagem na furação. Para a análise da influência das diferentes regiões do gume sobre a força e o momento torçor, os ensaios foram realizados de maneira a isolar os efeitos de cada região. A metodologia dos ensaios está descrita esquematicamente na figura 5.33 e foi desenvolvida segundo WITTE [89].

Os diferentes tipos de ensaios realizados com MQF aplicados por bicos externos são mostrados em quadros, onde a numeração superior à esquerda, relacionada com o tipo de ensaio desenvolvido (furação em cheio, furação com um pré-furo ou furação em uma barra). O desenho esquemático da situação de montagem do par broca / corpo de prova também está mostrado na figura, no lado esquerdo. No lado direito da figura está a descrição dos ensaios, juntamente com seus objetivos.

O ensaio do tipo 1 expressa a situação do processo de furação em cheio. Para este ensaio, tem-se o processo real de corte, ao longo da parcela cortante do gume principal, juntamente com o efeito da parcela de atrito das guias com a parede do furo.

O ensaio do tipo 2, furação em um pré-furo com o diâmetro igual ao da broca, permite obter a parcela do momento torçor referente somente ao efeito do atrito das guias com a superfície da parede do furo.

Na furação de uma barra de diâmetro igual à broca, ensaio do tipo 3, busca-se obter os esforços sem o efeito do atrito das guias da ferramenta sobre a superfície da parede do furo.

Na furação com um pré-furo com diâmetro igual ao diâmetro do núcleo da broca, ensaio do tipo 4, podem ser obtidos os esforços sem o efeito do gume transversal da broca.

Na furação em uma barra com diâmetro igual ao núcleo da broca, ensaio do tipo 5, pode-se obter o efeito do gume transversal sobre os esforços na furação.

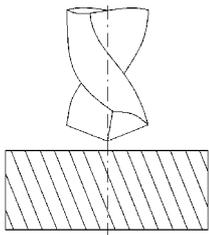
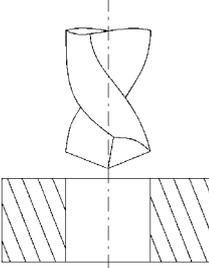
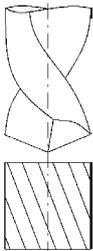
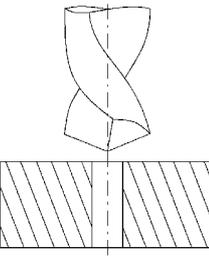
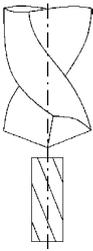
	<p>Processo real</p> <p>Deseja-se a medição da força e do momento</p>
<p>2</p> 	<p>Furação em furo com diâmetro igual ao da broca</p> <p>Efeito do atrito nas guias</p> <p>Deseja-se a medição da força e do momento</p>
<p>3</p> 	<p>Furação em uma barra com diâmetro igual ao da broca</p> <p>Ensaio sem o efeito do atrito nas guias</p> <p>Deseja-se a medição da força e do momento</p>
<p>4</p> 	<p>Furação sem o gume transversal</p> <p>Ensaio sem o efeito do gume transversal</p> <p>Deseja-se a medição da força e do momento</p>
<p>5</p> 	<p>Furação apenas com o gume transversal</p> <p>Efeito do gume transversal</p> <p>Deseja-se a medição da força e do momento</p>

Figura 5. 33 – Sistemática dos ensaios de esforços

A figura 5.34 mostra o resultado do momento torçor M_t para os ensaios do tipo 1, 2 e 3. Nestes ensaios é possível avaliar a influência do atrito das guias sobre o momento torçor M_t .

A influência do atrito das guias com a superfície da parede do furo sobre a força de avanço F_f não foi sensível, atingindo uma diferença inferior a 1%. A força de avanço é gerada predominantemente pela parcela cortante do gume principal e não pelas guias da ferramenta.

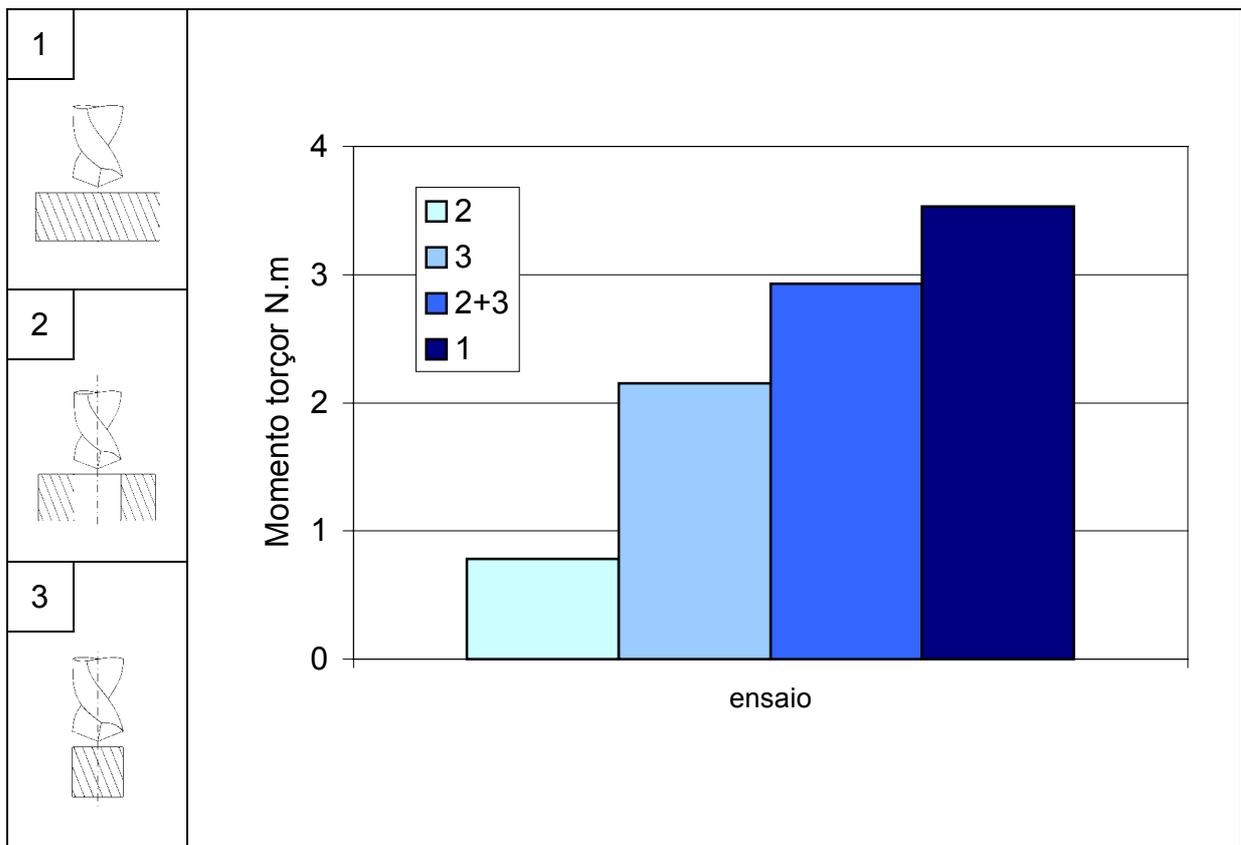


Figura 5. 34 – Influência do atrito das guias sobre o momento torçor M_t

A influência do atrito das guias sobre o momento torçor foi sensível para a condição de aplicação de MQF com bicos externos. O efeito das guias (ensaio do tipo 2) permaneceu em uma ordem de aproximadamente 25% do valor total medido (ensaio do tipo 1).

A diferença (cerca de 15%) entre o ensaio de furação em cheio, do tipo 1, e o somatório da furação de uma barra de diâmetro igual à broca (furação sem atrito nas guias – ensaio do tipo 3) e da furação com um pré-furo com diâmetro igual ao da

broca (furação com atrito das guias – ensaio do tipo 2) pode ser explicada pela diferente condição de saída dos cavacos. Para os ensaios do tipo 2 e 3 o cavaco encontra uma maior facilidade para sair da região do corte, pois, para estas condições, o cavaco não atrita com a parede do furo, como para o ensaio do tipo 1.

A figura 5.35 mostra a parcela referente à força de avanço no centro da broca (ensaio do tipo 5). Para este ensaio, tem-se a definição da componente obtida no centro da broca e a comparação com o processo real (1 = 4+5). Nestes ensaios são confirmados os dados obtidos por outros pesquisadores, que apontam a grande parcela da componente da força de avanço F_f , medida na região central da broca [46, 88, 89]. Esta pode ser explicada pelas baixas velocidades de corte aliadas a uma região em que o corte é praticamente substituído por uma deformação plástica que faz com que o material seja empurrado da região central para a região cortante do gume principal. Esta deformação plástica pôde ser observada nos corpos de prova após os ensaios, figura 5.36.

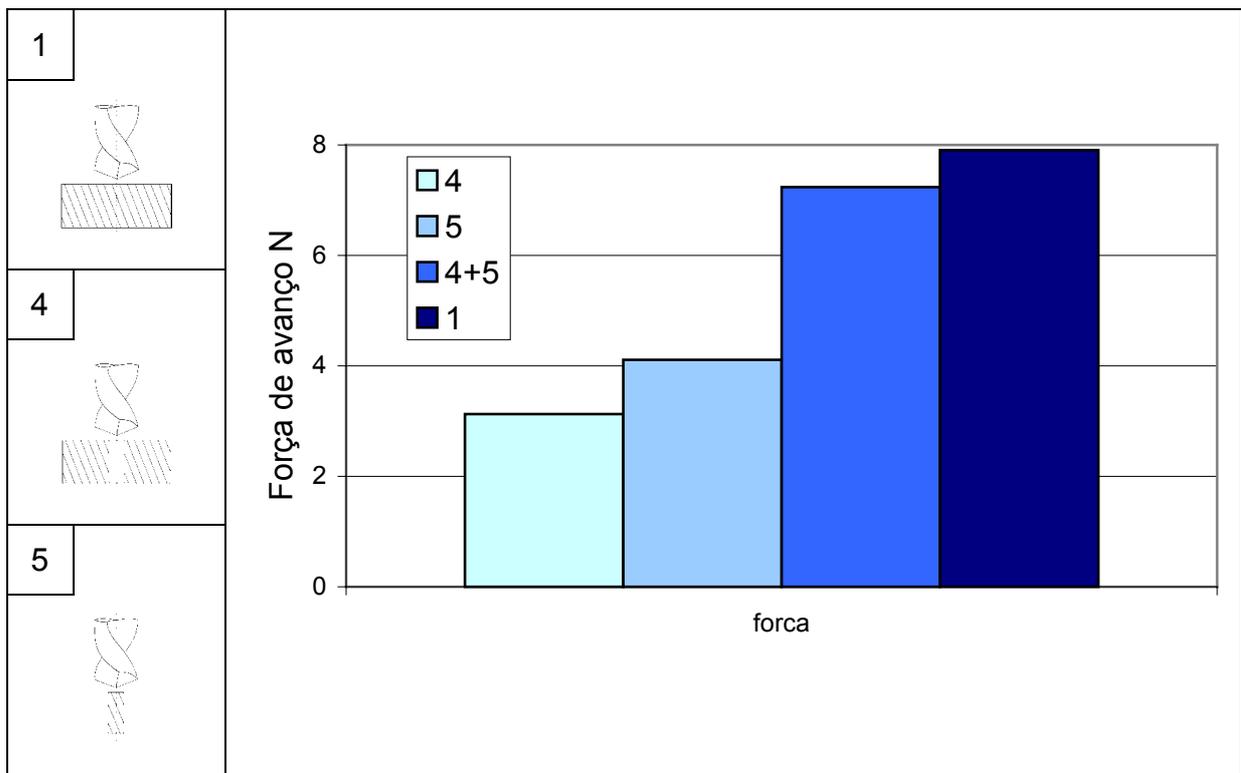


Figura 5. 35 – Influência da ponta da broca sobre a força de avanço

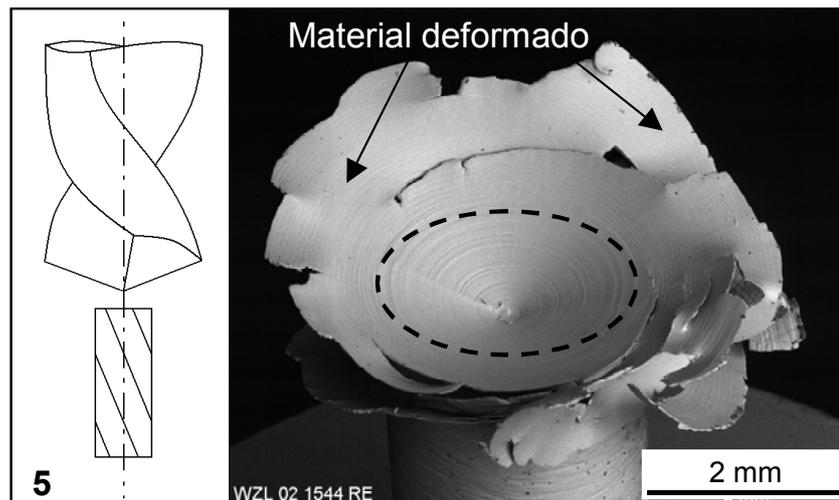


Figura 5.36 – Deformação plástica obtida no corpo de prova do ensaio do tipo 5

Todos os corpos de prova resultantes dos ensaios do tipo 5 apresentaram semelhante formação de material deformado. O círculo tracejado sobre a região delimita o núcleo da barra, figura 5.36. Praticamente todo o material foi deformado plasticamente, não havendo formação de cavaco para este tipo de ensaio.

As forças de avanço medidas para a região central da broca variam de acordo com os parâmetros e a geometria da ferramenta. Para ferramentas com um ângulo de ponta mais acentuado (broca do tipo 105), estes valores atingiram a ordem de grandeza de até 60% do esforço total de avanço. Neste caso o diâmetro da região central da broca é da ordem de 30% do diâmetro da broca.

Nos ensaios de furação de barras com diâmetros equivalentes ao diâmetro do núcleo (ensaios do tipo 5), houve grande dificuldade para a realização das medições dos esforços, devido à flexão dos corpos de prova de pequeno diâmetro (2,65 mm) e grande comprimento (20 mm). Para contornar os problemas de flexão dos corpos de prova e para garantir medições confiáveis dos esforços na furação de barras com diâmetro equivalentes à região central da broca, foi necessário reduzir o comprimento dos corpos de prova em 50% e melhorar sua fixação. Como o tempo de medição com isto ficou reduzido na mesma proporção, um menor valor de dados pôde ser adquirido. Mas as repetições realizadas mostraram que os resultados se situam num intervalo de confiança aceitável.

A figura 5.37 apresenta os valores medidos para duas diferentes concepções de ferramentas de corte, sendo uma de 2 gumes (tipo 411) e outra de 3 gumes (tipo 105), com redução do gume transversal.

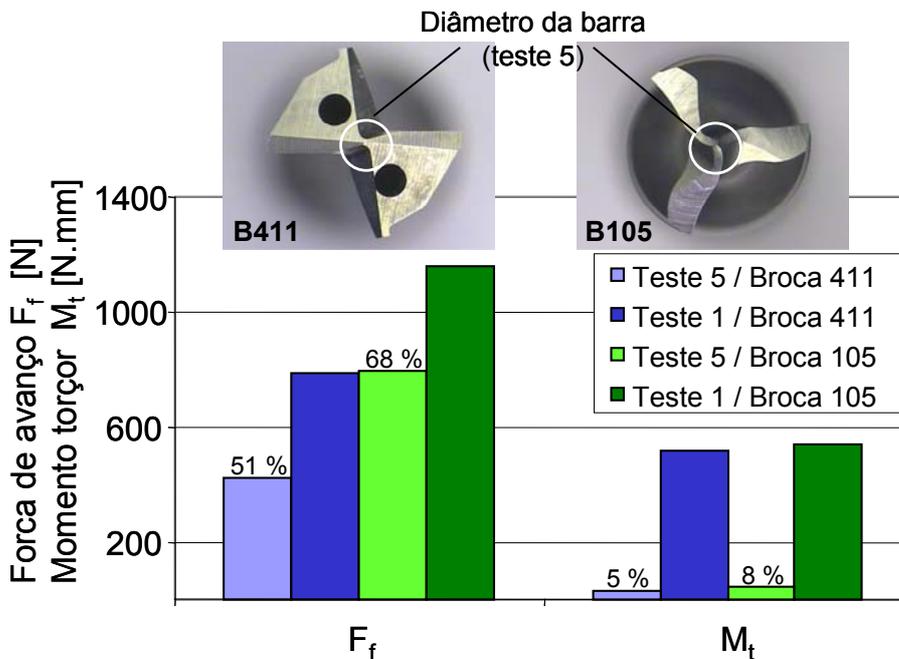


Figura 5. 37 – Influência da concepção de broca empregada sobre a força de avanço e sobre o momento torçor, na região central de uma broca de 2 gumes (tipo 411) e uma de 3 gumes (tipo 105)

Os resultados mostram que o aumento do número de gumes (de 2 para 3 gumes) e a variação da geometria da broca possui uma influência clara sobre os esforços de avanço, principalmente sobre a força de avanço F_f . Esta diferença pode ser explicada pelo fato de na broca de 2 gumes a redução do gume transversal ter reduzido a ação de esmagamento do núcleo da broca, pois a parte cortante do gume é aumentada pelo valor equivalente da redução do gume transversal.

Na broca de 3 gumes, na região central as partes cortantes apresentam um ângulo de incidência efetivo menor que a direção de corte efetiva. Desta forma uma parcela acentuada de material da região central não é cortada, e sim empurrada plasticamente para os lados, até atingir a região cortante do gume principal. Para a broca de 2 gumes com redução do gume transversal a furação do corpo de prova com diâmetro equivalente ao núcleo da barra levou a um esforço correspondente a 51% em

relação à furação em cheio. Já para a broca de 3 gumes (tipo 105), os esforços de avanço na região do gume transversal atingiram até 68% do esforço total.

Para todos os ensaios desenvolvidos, os efeitos da geometria do centro da broca sobre o momento torçor M_t não foram significativos, sendo que a diferença permaneceu numa faixa de 5% à 8% do momento verificado para a furação em cheio.

Esta análise ressalta a importância de se ter uma geometria da ponta da broca adequada às condições mais severas de trabalho, como as impostas à ferramenta para a usinagem da liga de titânio Ti6Al4V a seco e com aplicação de MQF.

Os dados tecnológicos são de fundamental importância para empresas fabricantes de brocas, pois, com a compreensão dos esforços e o conhecimento do perfil deste esforço sobre o gume, são possíveis melhorias da geometria da ferramenta alcançando uma redução dos esforços, e conseqüentemente a diminuição de problemas como o lascamento ou a fratura da quina do gume. Os lascamentos, resultante de elevados esforços e elevadas temperaturas, são freqüentemente apresentados como critérios de fim de vida na furação.

5 GRANDEZAS TECNOLÓGICAS INFLUENTES SOBRE O PROCESSO DE FURAÇÃO DA LIGA Ti6Al4V COM MINIMIZAÇÃO DE FLUIDO LUBRIFICANTE

5.1 ensaio

5.2 Grandezas Mecânicas Influentes sobre o Processo

5.2.1 Efeitos sobre a ferramenta de corte

Figura 5. 1Figura 5. 2Figura 5. 3Figura 5. 4Figura 5. 5Figura 5. 6Figura 5. 7Figura 5. 8Figura 5. 9Figura 5. 10Figura 5. 11Figura 5. 12Figura 5. 13Figura 5. 14Figura 5. 15Figura 5. 16Figura 5. 17Figura 5. 18Figura 5. 19Figura 5. 20Figura 5. 21Figura 5. 22Figura 5. 23Figura 5. 24Figura 5. 25Figura 5. 26Figura 5. 27Figura 5. 28Figura 5. 29Figura 5. 30Figura 5. 31Figura 5. 32Figura 5. 33 Figura 5. 34Figura 5. 35 Figura 5. 36 Figura 5. 37

Para poder avaliar a distribuição dos esforços ao longo da parcela cortante do gume principal e obter informações sobre a força de corte e a força passiva, foi desenvolvido um ensaio de torneamento quase ortogonal de um tubo.

Como ferramenta foi empregada uma broca, conforme ilustrado na figura 5.38. O diâmetro do tubo é maior que o diâmetro da broca, de forma que, com um posicionamento excêntrico da broca em relação ao tubo, é possível usinar com apenas uma das partes cortantes do gume principal.

O dispositivo de fixação da broca está montado sobre uma plataforma piezelétrica, permitindo avaliar as três componentes da força de usinagem. Para poder avaliar a influência sobre diversas regiões da parte cortante do gume principal da broca, foram usinados tubos com diferentes espessuras de parede, conforme mostrado nas figuras 5.39 e 5.40.

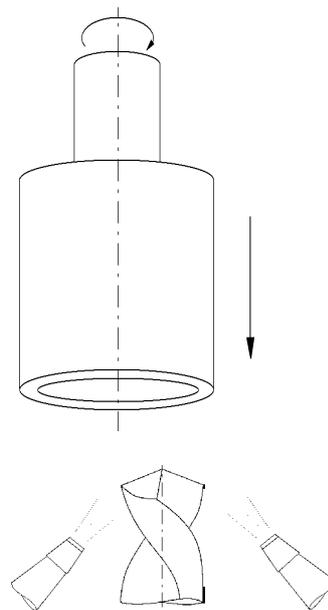


Figura 5. 38 – Esquemática do torneamento ortogonal com uma broca de 2 gumes

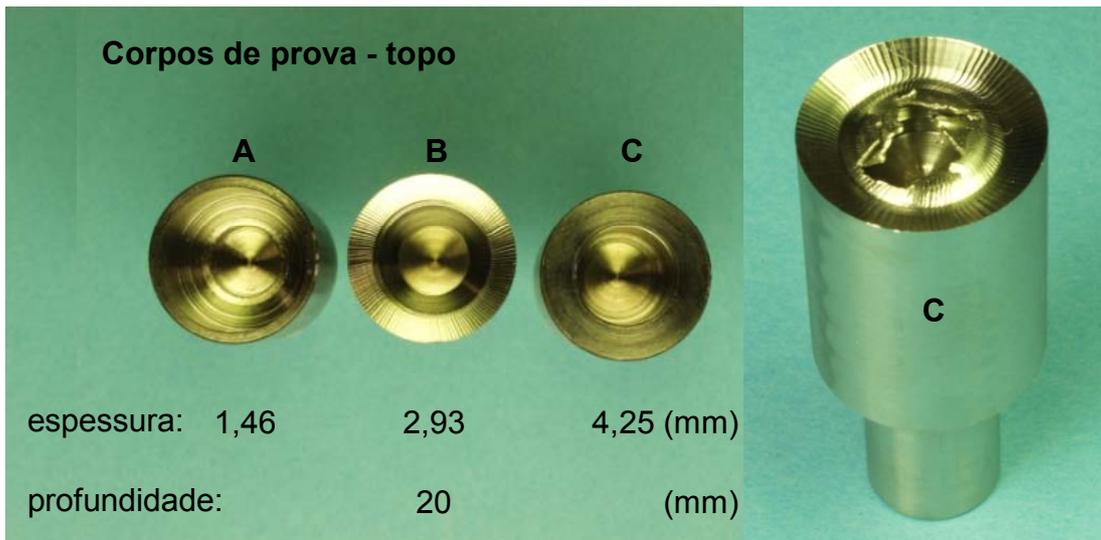


Figura 5. 39 – Dimensões dos tubos utilizados nos ensaios e detalhe do tubo C após o ensaio

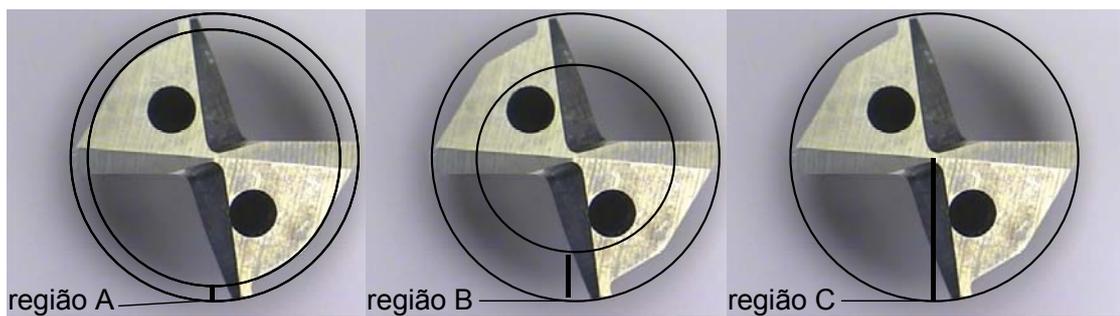


Figura 5. 40 – Regiões (espessuras do tubo) de análise na broca de 2 gumes

A figura 5.41 mostra de forma esquemática o posicionamento do tubo em relação à broca.

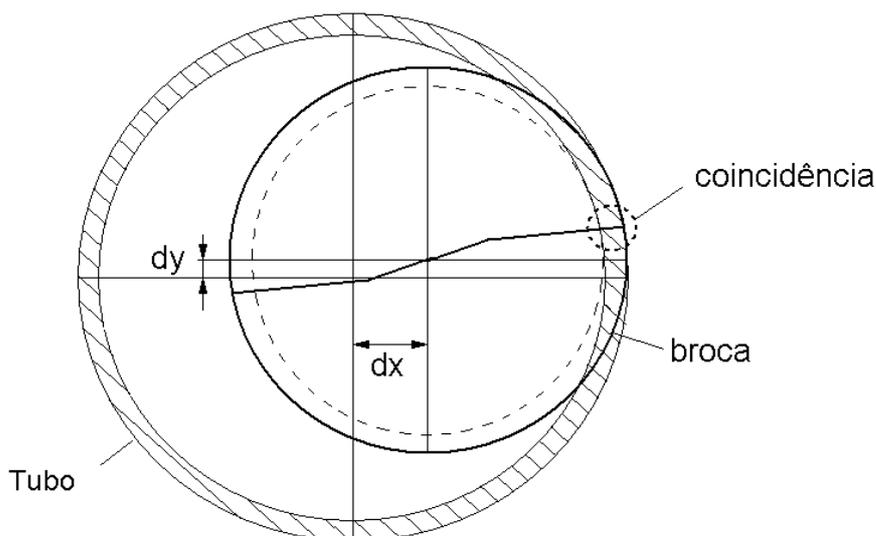


Figura 5. 41 – Posicionamento do par tubo / broca

O deslocamento positivo no eixo “y” permite otimizar os resultados em relação a um torneamento ortogonal puro.

Para cada seção usinada são determinados os deslocamentos nas direções x e y.

Durante o desenvolvimento dos ensaios com o tubo com largura de usinagem igual ao comprimento de uma das partes cortantes do gume principal da broca apresentaram-se problemas de flexão seguidos de quebra da broca.

Na parte central da região usinada se observa uma deformação plástica do material, figura 5.39, detalhe do corpo de prova C. A dinâmica de formação de cavacos levou a vibrações intensas, também identificadas visualmente.

Devido aos problemas ocorridos no torneamento ortogonal do corpo de prova com largura de usinagem igual ao comprimento de uma das partes cortantes do gume principal da broca, não foram obtidos resultados confiáveis.

A figura 5.42 mostra as três componentes da força de usinagem para o torneamento ortogonal dos tubos com espessura de 1,46 mm e espessura de 2,93 mm, para a condição $d = 8,5$ mm (broca do tipo 411).

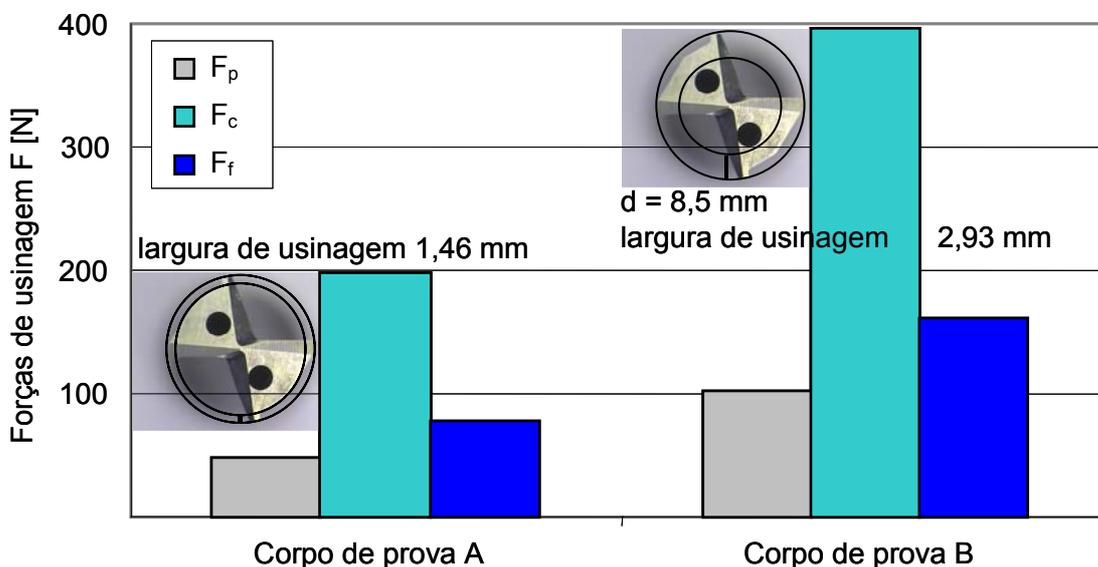


Figura 5. 42 – Decomposição das forças na furação

Para a espessura de parede de 1,46 e de 2,93 mm, a força de corte foi superior que a força de avanço e a força passiva, para as regiões do gume de corte A e B. Para a usinagem do tubo do tipo A, de espessura 1,46 mm, apresentaram-se valores de força passiva de 50 N, força de corte de 200 N e força de avanço de 77 N. Nos ensaios com o tubo do tipo B, de espessura 2,93 mm, foram medidos 100 N, 400 N e 180 N, respectivamente.

Verifica-se que as componentes das forças de usinagem têm um valor uniforme sobre o gume principal da broca (tipo 411). Para um aumento de 2 vezes na espessura de corte (tubo A em relação ao B), foram obtidos valores aproximadamente duas vezes maiores das componentes. O fato de a broca do tipo 411 possuir um gume reto na região analisada, figura 5.40, o ângulo de saída ser de (aproximadamente) 0° e de incidência (aproximadamente) 10° , não apresentando significativas variações ao longo do gume, permite explicar este comportamento.

Para a melhor compreensão dos efeitos dos cavacos sobre o atrito com a parede do furo, que propicia maiores esforços sobre o gume e sobre a quina, resultando na formação de micro-lascamentos, buscaram-se informações nas características dos

cavacos formados na furação de Ti6Al4V com mínimas quantidades de fluido de corte.

c) Cavaco

O transporte de cavacos para fora do furo é um fator importante para o processo de furação. O cavaco que não for transportado adequadamente pode trancar entre a guia e a parede do furo e impedir a entrada do fluido lubri-refrigerante (quando for o caso) e levar à quebra da ferramenta [2 – 4].

O preenchimento dos canais da broca com cavacos também pode acarretar um sobre-aquecimento no processo devido ao contato destes cavacos com a superfície da parede do furo. Esta condição de contato indesejado gera um aumento da temperatura e a superfície do furo apresenta uma tendência a piores qualidades da superfície usinada. O aumento destas solicitações térmicas prejudica a integridade superficial da parede do furo, especialmente crítico para a usinagem de componentes de turbinas aeronáuticas.

Na usinagem com MQF aplicado por bicos externos e a seco, como já citado e mostrado anteriormente (figura 5.3), o cavaco obtido apresentou-se em forma lamelar, tipo longo e emaranhado em torno da ferramenta de corte. Isto dificultou a entrada da névoa atomizada pelos bicos externos de aplicação de MQF. Para esta condição, inclusive para baixas velocidades de corte, o tipo do cavaco obtido foi longo e com um elevado fator de deformação e recalque. Esta taxa de deformação elevada acarretou o preenchimento dos canais de escoamento do cavaco e, além de dificultar a entrada do meio lubrificante, aumentou o contato do cavaco com a superfície da parede do furo.

A figura 5.43 mostra detalhe dos cavacos formados na furação com MQF aplicado com bicos externos, mostrando a forma e as deformações decorrentes da acomodação do cavaco nos canais de escoamento da broca. À direita da figura, parte superior, é mostrado o cavaco para a condição de furação a seco, onde as taxas de recalque foram maiores que as obtidas com MQF aplicado com bicos externos.

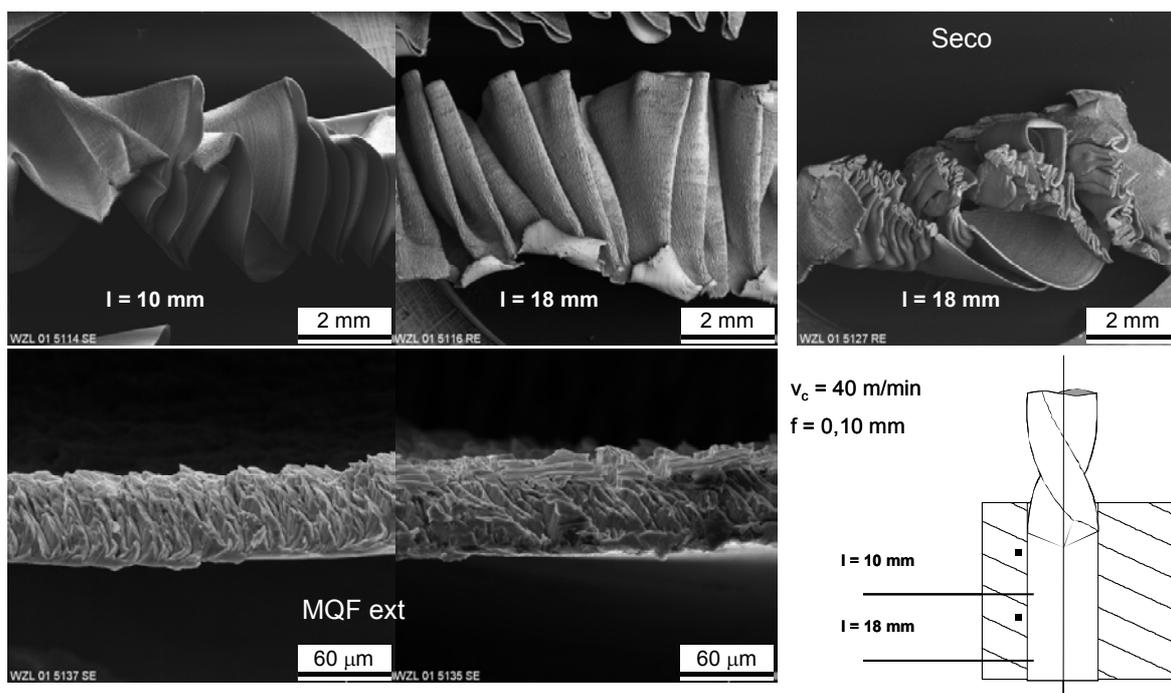


Figura 5. 43 – Detalhe dos cavacos formados na furação com MQF aplicado por bicos externos e a seco para as profundidades de 10 e 18 mm

À medida que aumenta a profundidade de furação, aumenta a dificuldade de transporte de cavacos pelos canais e aumenta o fator de recalque, figura 5.43, $l = 10$ e $l = 18$ mm.

Em comparação ao cavaco observado na furação a seco (à direita da figura 5.43), para uma mesma profundidade de furação, o cavaco gerado na furação com MQF aplicado por bicos externos apresentou uma sensível melhora.

O cavaco observado na furação com MQF aplicado por bicos externos e com a metodologia do avanço intermitente, apresentou uma facilidade de transporte grande e conseqüentemente menor fator de recalque. A comparação dos cavacos obtidos na furação com MQF aplicado por bicos externos, com e sem avanço intermitente, é mostrada na figura 5.44.

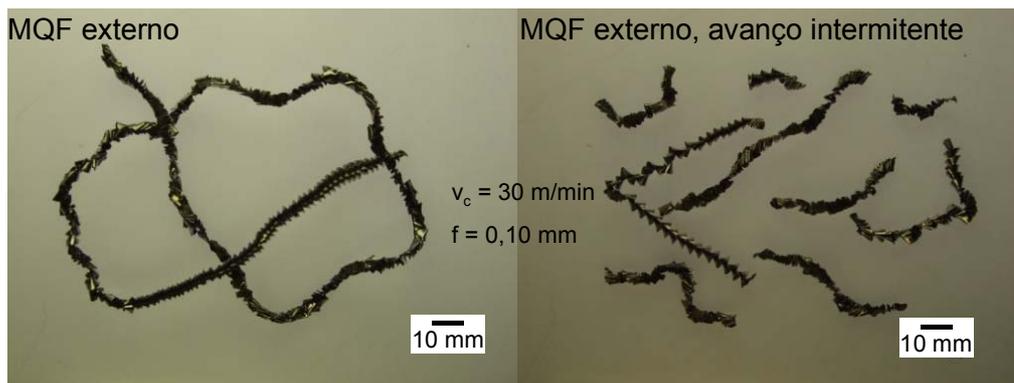


Figura 5. 44 – Detalhe do cavaco obtido no processo com MQF aplicado por bicos externos com avanço normal e com avanço intermitente, para uma velocidade de corte de 30 m/min

Para a usinagem com MQF aplicado pelo interior da ferramenta, os cavacos apresentaram formas mais favoráveis do que para a condição de MQF aplicado por bicos externos ou a seco, não se emaranhando em torno da broca.

Na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta, foi possível um aumento da velocidade de corte sem prejudicar a forma e o tipo de cavaco.

A figura 5.45 mostra os cavacos obtidos para velocidades de corte de 10, 15, 20, 30 e 40 m/min. Para a velocidade de corte de 30 m/min, também é mostrado o cavaco obtido com o avanço intermitente.

Para velocidades de corte de 10, 15 e 20 m/min, os cavacos apresentaram a forma lamelar, em segmentos curtos, com o transporte facilitado para fora do furo. Para a velocidade de corte de 30 m/min, apresentaram a forma de segmentos mais longos, com certa dificuldade de transporte, e para valores de velocidade de corte igual ou superiores a 40 m/min, apresentaram a forma de segmentos longos, apresentando maiores dificuldades de transporte para fora do furo. Em decorrência da menor temperatura na região de formação de cavacos para baixas velocidades de corte, as tensões na rede cristalina decorrente da formação plástica não se recuperam e o cisalhamento entre as lamelas é mais completo. À medida que a velocidade de corte aumenta, a temperatura da raiz do cavaco também aumenta, e a recuperação é maior, permitindo maiores deformações e impedindo a separação das lamelas.

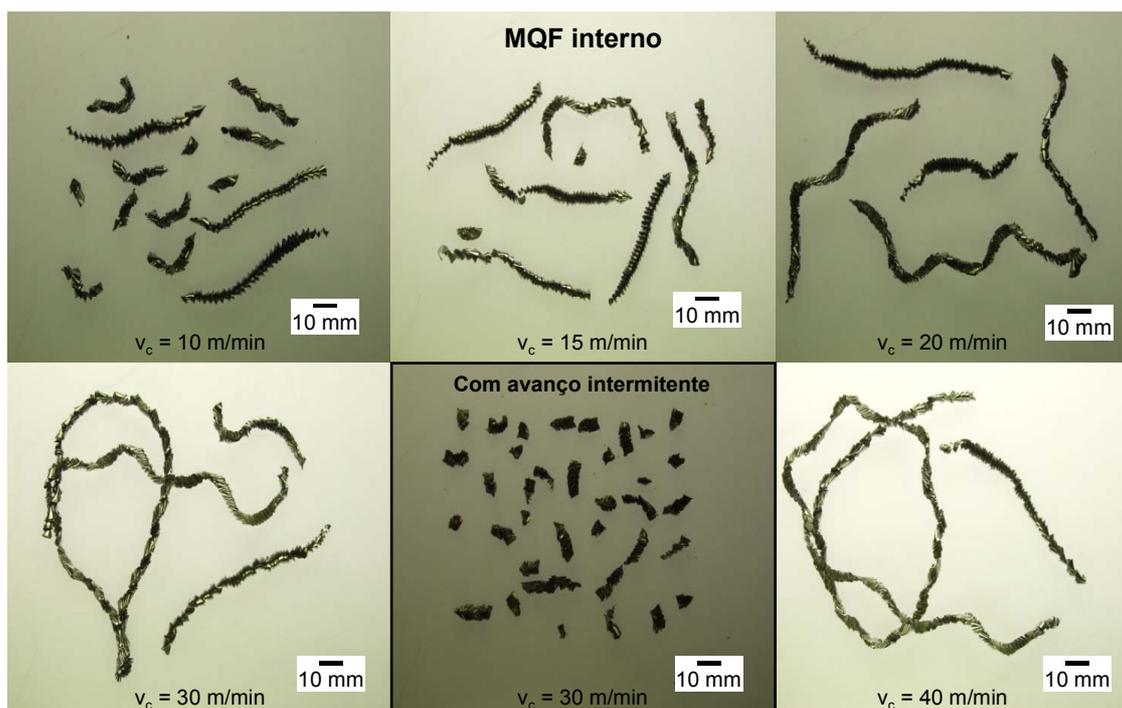


Figura 5.45 – Cavacos obtidos no processo de MQF aplicado pelo interior da ferramenta, para as velocidades de corte de 10, 15, 20, 30 e 40 m/min; com avanço contínuo e com avanço intermitente para uma velocidade de corte de 30 m/min

Quando se aplica emulsão pelo interior da ferramenta, os tipos de cavacos gerados são classificados como bons [4]. Os melhores resultados foram apresentados para as velocidades de corte de até 40 m/min e pressões do fluido lubri-refrigerante acima de 30 bar, figura 5.46.

Uma forma para propiciar a quebra de cavacos, citada na literatura [123, 125], é o emprego de jatos de fluido lubri-refrigerante de elevada pressão aplicados sobre a região de formação do cavacos. As máquinas disponíveis para os ensaios permitiram a aplicação de um jato de fluido com uma pressão de alimentação de até 150 bar. A quebra dos cavacos é favorável, não se formando emaranhados ao redor da ferramenta.

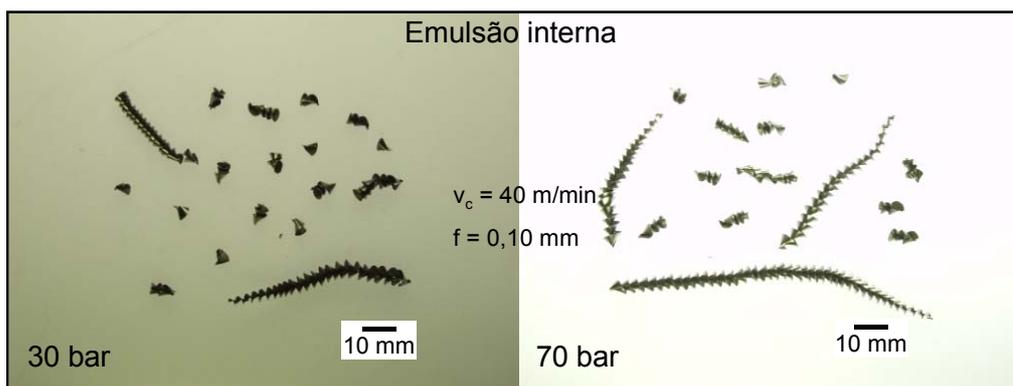


Figura 5. 46 – Cavacos obtidos na furação com emulsão aplicada pelo interior da ferramenta para a velocidade de corte de 40 m/min, com 30 e 70 bar de pressão do fluido lubri-refrigerante

O atrito do cavaco com a parede do furo, somado às elevadas solicitações mecânicas e térmicas, modificam as características da superfície e da camada limite. Para elucidar estas modificações ocorridas na furação de Ti6Al4V com mínimas quantidades de fluido de corte, faz-se necessário um estudo dos efeitos sobre a peça, tanto quanto para a integridade da superfície usinada como para a forma do furo.

5.2.2 Efeitos sobre a peça

Na fabricação de peças de responsabilidade, como componentes para turbinas aeronáuticas, o conhecimento e controle dos efeitos dos processos de fabricação sobre a superfície da peça é de grande importância para a segurança dos componentes fabricados [17]. Assim, faz-se necessário um estudo comparativo dos efeitos sobre a peça para as diferentes condições de aplicação de fluidos de corte. Dessa forma, é possível analisar o efeito da ausência das funções primárias dos fluidos de corte, quando da retirada total ou parcial do fluido lubri-refrigerante. Como descrito superficialmente nos capítulos anteriores, a total ausência do fluido lubri-refrigerante e a condição de aplicação de MQF aplicado por bicos externos, para profundidades superiores a uma vez o diâmetro, propiciaram a formação de caldeamentos na superfície do furo, praticamente inviabilizando a sua utilização para a fabricação de componentes aeronáuticos.

Dessa forma, é importante conhecer os efeitos da aplicação de MQF pelo interior da ferramenta, comparando esta com a condição usual de aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta e com as condições de aplicação de MQF por bicos externos e a seco.

Os efeitos mecânicos sobre a peça estão divididos em avaliação do processo sobre a integridade da superfície usinada e sobre a forma do furo. Foram avaliadas a rugosidade, as deformações plásticas, o caldeamento de partículas de cavaco na superfície da peça e o endurecimento da superfície da parede do furo. Também foi avaliada a formação de micro-trincas na superfície da parede do furo. Para a avaliação da forma do furo, foram avaliados o diâmetro nominal do furo, a circularidade e a cilindridade. A formação de rebarbas, na saída do furo, também foi observada.

a) Efeitos sobre a integridade da superfície usinada

A integridade da parede do furo é de primordial importância para peças que trabalharão sob condições de carregamento mecânico e térmico. Em componentes desenvolvidos para a indústria aeronáutica, faz-se necessário o controle da integridade da parede do furo através da avaliação contínua das grandezas influentes sobre a superfície e suas características.

Rugosidade

Um parâmetro de rugosidade, freqüentemente adotado para o processo de furação, é a média da rugosidade R_z . Para este trabalho foi pré-estabelecido como limite, uma rugosidade R_z de 8 μm , limite sugerido pelas empresas usuárias deste processo. A rugosidade foi medida três vezes em todos os furos.

Na figura 5.47 é apresentado o comportamento da rugosidade R_z como função do número de furos para as condições de aplicação de emulsão e MQF pelo interior da ferramenta, para aplicação de MQF com bicos externos, e a seco. Os parâmetros de corte foram os usualmente empregados para emulsão aplicada em abundância, com velocidade de corte $v_c = 40$ m/min e um avanço $f = 0,10$ mm.

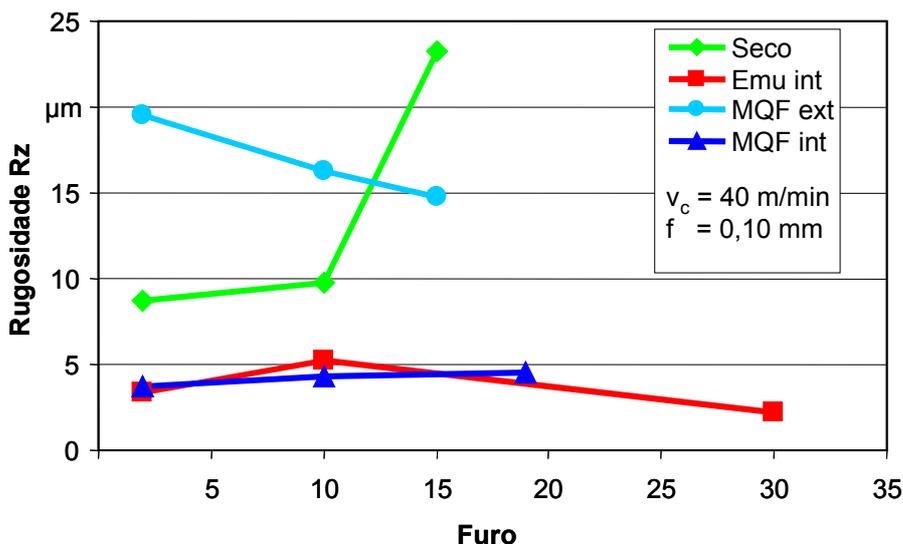


Figura 5. 47 – Rugosidade R_z para diferentes tipos de aplicação de fluido lubri-refrigerante

Os melhores resultados foram obtidos para as condições de emulsão abundante e de MQF aplicados pelo interior da ferramenta. Para os ensaios realizados com emulsão e MQF aplicados pelo interior da ferramenta, foram registrados valores de R_z abaixo de $6 \mu\text{m}$. Estes valores estão plenamente dentro dos limites impostos pelos usuários finais das peças, limite estabelecido de R_z inferior a $8 \mu\text{m}$.

A rugosidade para MQF aplicado com bicos externos e a seco apresentaram valores acima do limite pré-estabelecido. Para MQF aplicado por bicos externos, obteve-se uma melhora sensível da rugosidade com o aumento do número de furos. Os valores medidos de R_z para o segundo furo foram da ordem de $19 \mu\text{m}$ e atingiram a faixa de $15 \mu\text{m}$ após 15 furos. Na furação a seco, os valores iniciais registrados estavam na ordem de $9 \mu\text{m}$ e após 15 furos ultrapassaram o limite de $20 \mu\text{m}$.

Avaliando a superfície do furo, verifica-se que na usinagem com MQF aplicado externamente, escamas caldeadas na parede do furo passam a ser mais e mais alisadas com o aumento do número de furos. Na usinagem a seco também se formam escamas de material caldeado sobre a superfície do furo que não sofre um alisamento, e sim piora a qualidade do furo com a progressão da profundidade total usada. Julga-se que as pequenas quantidades de lubrificante disponibilizado pelo sistema MQF, propiciou o alisamento das escamas sobre a parede do furo, propiciando um arredondamento do gume secundário, ao passo que para a usinagem a

seco micro-lascamentos e o atrito metálico propiciam uma piora gradual da superfície.

Em uma análise direcionada para a aplicação de MQF é mostrado que os melhores valores apresentaram-se para o MQF aplicado pelo interior da ferramenta. A figura 5.49 mostra as curvas de comportamento para os três parâmetros de rugosidade mais usuais (R_z , R_{max} e R_a) como função da velocidade de corte.

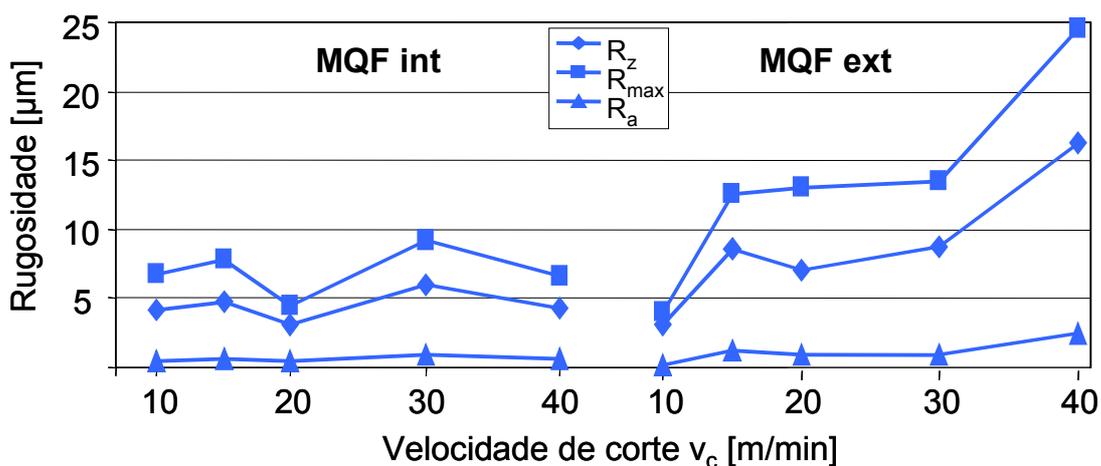


Figura 5. 48 – Rugosidade como função da velocidades de corte, para as condições de MQF aplicado pelo interior da ferramenta e com bicos externos

Os maiores valores de rugosidade para a condição de MQF aplicado pelo interior da ferramenta foram registrados para as velocidades de corte de 15 e 30 m/min. Para estas duas velocidades de corte também foram obtidas as maiores dispersões das vidas das ferramentas (ver figura 5.22).

Na usinagem com MQF aplicado com bicos externos, os valores de rugosidade aumentam progressivamente com o aumento da velocidade de corte, já apresentando valores inadmissíveis de $R_z = 8 \mu\text{m}$ para a velocidade de corte de 15 m/min. Para a velocidade de corte de 40 m/min, houve um aumento hiper-proporcional dos valores, na ordem de aproximadamente 100% em relação as obtidas para a velocidade de corte de 30 m/min.

Os resultados obtidos com MQF aplicado pelo interior da ferramenta ainda são melhores quando na furação com ferramentas do tipo 25, modificadas com o micro-

polimento do gume, mostrado na figura 5.20. A figura 5.49 mostra os melhores resultados de rugosidade obtidos para a broca com micro-polimento do gume.

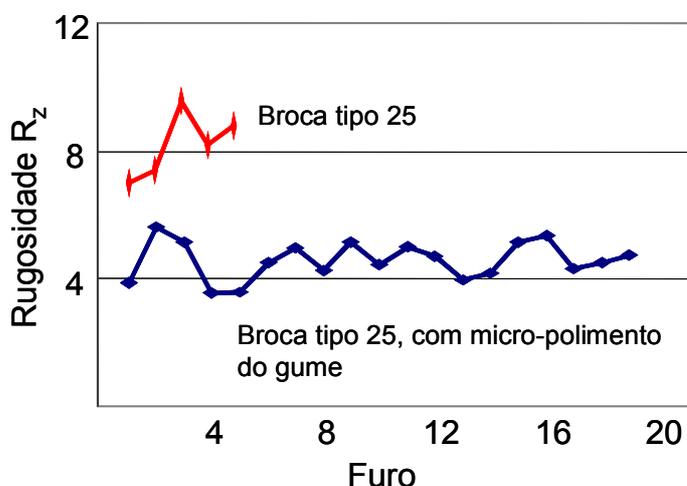


Figura 5. 49 – Comportamento da rugosidade em relação a evolução do número de furos para MQF aplicado internamente, com a broca do tipo 25

Para a ferramenta com micro-polimento do gume (broca tipo 25) foi obtida uma rugosidade R_z de 4 μm , aproximadamente a metade do valor obtido para a broca sem o micro-polimento do gume. A vida desta broca apresentou um aumento superior a 350% (de 5 para 19 furos) em relação à broca sem o micro-polimento do gume.

Verifica-se a tendência de um ligeiro aumento dos valores de rugosidade em relação ao aumento do número de furos executado. Este resultado é contrário ao resultado mostrado por HEWSON [91], que apresenta uma redução da rugosidade ao longo do número de furos na furação a seco da liga Ti6Al4V. HAAN et al verificaram que a furação sem fluido apresenta os piores valores de rugosidade [98], o que está em conformidade com os resultados aqui encontrados.

Em busca de melhores resultados de rugosidade na furação para a condição de MQF aplicado por bicos externos, foi avaliado o comportamento com ferramentas revestidas e não-revestida. Os revestimentos adotados (TiAlN, TiCN e CrCN) foram depositados sobre o substrato da classe K10 com grão fino, também testado sem revestimento. A figura 5.50 mostra as curvas do comportamento da qualidade da superfície usinada para as velocidades de corte de 15 e 30 m/min.

O comportamento de rugosidade apresentou-se semelhante para todas as ferramentas, com exceção do revestimento de TiAlN, que apresentou valores de rugosidade superiores (cerca de 100%) aos medidos para as outras ferramentas. A explicação para este aumento da rugosidade pode ser o menor coeficiente de condutividade térmica deste revestimento, influenciando diretamente o material caldeado sobre a superfície da parede do furo.

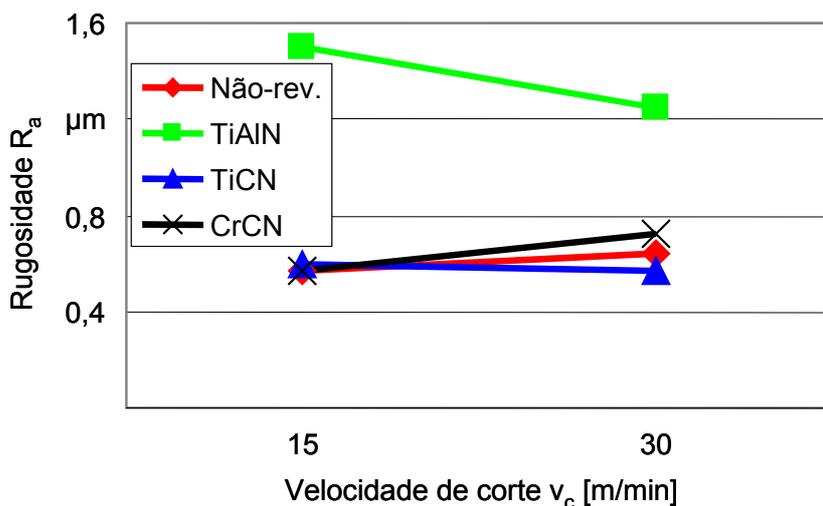


Figura 5. 50 – Comportamento da rugosidade R_a da superfície de furos usinados com brocas do tipo 105 sem e com diferentes revestimentos (TiAlN, TiCN e CrCN)

Para a broca revestida com TiAlN, com o aumento da velocidade de corte de 15 para 30 m/min, obteve-se uma melhora da rugosidade em torno de 20%. Estes valores de rugosidade foram medidos para os décimos furos de cada ferramenta testada, a uma profundidade de 10 mm.

Para a broca revestida com TiCN os valores de rugosidade permaneceram na mesma ordem e para as demais ferramentas, as rugosidades apresentaram um ligeiro incremento, na ordem de até 20% para a broca revestida com CrCN e 10% para a broca não-revestida.

Verifica-se uma tendência de um ligeiro aumento da rugosidade do primeiro ao último furo realizado pela ferramenta, como mostra a figura 5.51.

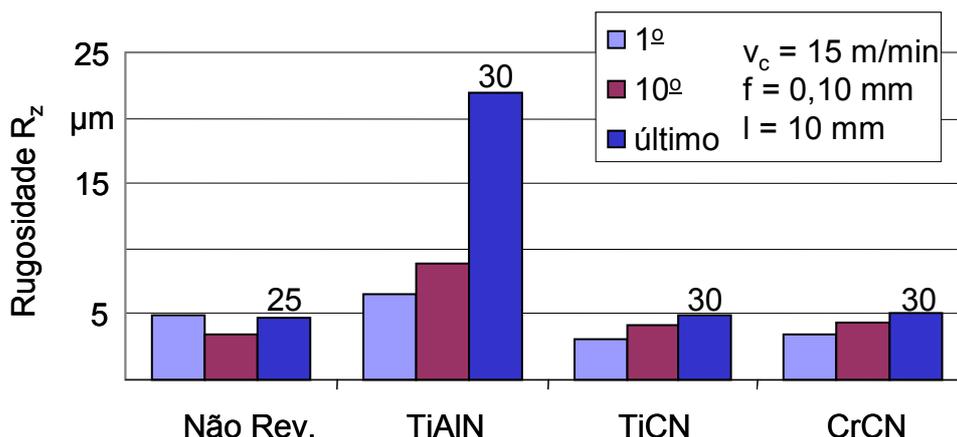


Figura 5. 51 – Rugosidade do primeiro, décimo e último furo para a ferramenta do tipo 105

A tendência do aumento da rugosidade ao longo do número de furos seguiu-se para todas as ferramentas revestidas. Para a ferramenta não-revestida, este comportamento de aumento da rugosidade não foi observado.

Em complemento ao comportamento da figura 5.50, para a ferramenta revestida com TiAlN foram medidos os maiores valores de rugosidade para todos os furos avaliados. Como descrito anteriormente, este resultado poderia estar ligado às características do revestimento. A afinidade dos elementos constituintes do revestimento, o titânio e o alumínio, com a liga de titânio Ti6Al4V, também poderiam influenciar no aumento da camada caldeada sobre a superfície da parede do furo, propiciando assim maiores rugosidades.

Nos ensaios realizados com alargadores sob a condição de MQF aplicado através de orifícios preparados na ferramenta, foram obtidos valores de rugosidade compatíveis com aqueles obtidos com emulsão aplicada pelo interior da ferramenta. Entretanto, para obter este resultado, foi necessário utilizar uma velocidade de corte de 15 m/min ($f = 0,12$ mm), aproximadamente 25% menor que a empregada na condição usual. Para velocidades de corte acima de 15 m/min o gume único regulável do alargador apresentou micro-lascamentos e não alcançou o número mínimo pré-estipulado de 10 furos.

A figura 5.52 mostra os três principais parâmetros de rugosidade avaliados, R_z , R_{max} e R_a , bem como o desvio dos valores obtidos para a rugosidade R_z , para o alargamento com gume único regulável sob aplicação de MQF pelo interior da ferramenta.

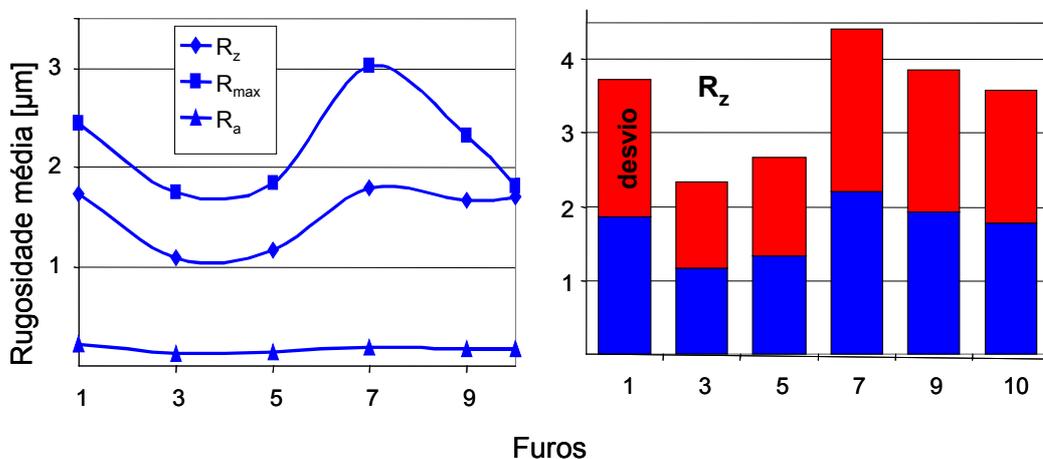


Figura 5. 52 – Rugosidade obtida para o alargamento com MQF aplicado pelo interior da ferramenta

Para esta condição de usinagem, velocidade de corte $v_c = 15$ m/min e avanço $f = 0,12$ mm, foram alargados 10 furos sem ser atingido um dos critérios de final de vida. No entanto, como os objetivos propostos pelo trabalho, para o processo de alargamento, era avaliar a exequibilidade sob aplicação de MQF pelo interior da ferramenta e medir as características do furo gerado, não se preocupou em chegar ao final da vida da ferramenta. Após o décimo furo, a ferramenta apresentava um desgaste de flanco máximo VB_{max} na ordem de 4 µm, isto é, da ordem de grandeza do arredondamento do raio da ferramenta, um desgaste desprezível.

O alargamento da liga de aço inoxidável martensítico X5CrNiCuNb17-4-4 também foi realizado sob a aplicação de MQF pelo interior da ferramenta. Para estes ensaios foram medidos valores de rugosidade R_z abaixo de 14 µm, e os de R_a abaixo de 2,4 µm. Os valores foram crescentes ao longo do aumento do número de furos, como também verificado para o alargamento da liga de titânio. Este aumento da rugosidade pode estar atribuído ao crescente aumento do desgaste de flanco máximo VB_{max} , que após o décimo furo estava na ordem de 80 µm. Para este ensaio, empregou-se uma menor velocidade de corte, $v_c = 10$ m/min, e igual avanço $f = 0,12$ mm.

No fresamento circular periférico foram obtidos valores máximos de $R_z = 4,10 \mu\text{m}$, $R_{\text{max}} = 4,50 \mu\text{m}$ e $R_a = 0,65 \mu\text{m}$. Estas medições foram realizadas para o único furo feito com a melhor condição de usinagem desenvolvida, conforme estratégia mostrada na figura 4.6, numa profundidade de 5 mm. Para o ensaio de fresamento foram utilizados parâmetros de corte recomendados pelo fabricante [92] e pela literatura [93 - 97], conforme mostrado anteriormente na tabela 4.5.

Deformação plástica e endurecimento da camada superficial e sub-superficial da parede do furo

Os valores de rugosidade medidos de forma isolada não fornecem subsídios suficientes para uma avaliação rigorosa da integridade da superfície do furo. Exemplo disto são os dados mostrados anteriormente, onde o material aderido sobre a superfície pode mascarar os valores de rugosidade. São necessárias outras informações adicionais para uma melhor avaliação sobre a real integridade da superfície do furo. Uma informação muito adotada pela indústria é a profundidade das deformações plásticas e o endurecimento da camada superficial e sub-superficial, oriundos das solicitações térmicas e mecânicas durante o processo de corte.

Na manufatura de componentes para turbinas aeronáuticas, os processos de furação convencionais são seguidos de processos de acabamento. Os processos de acabamento empregados na seqüência à furação com brocas helicoidais, além de melhorarem a qualidade geométrica do furo, também objetivam reduzir os efeitos da furação sobre a camada limite, removendo a mesma. A espessura da camada limite influenciada pelo processo de alargamento com alargador de gume único regulável é consideravelmente menor que a do processo de furação com brocas helicoidais.

Em ensaios de furação com MQF aplicado por bicos externos, a má qualidade da superfície do furo foi perceptível a olho nu. A figura 5.53 mostra o material caldeado na superfície da parede do furo. A foto (A) mostra a parede do furo numa distância de referência da superfície $l = 10 \text{ mm}$ com material caldeado em forma de escamas. A foto (B) mostra a superfície numa distância da superfície $l = 20 \text{ mm}$ com partículas de material maiores caldeadas na parede do furo. A foto (C) mostra um detalhe, em perspectiva, da rebarba formada no fundo do furo. Esta formação de rebarba foi típica para a condição de aplicação de MQF por bicos externos. Este comportamento

de caldeamento de material e formação de rebarba foi monitorado na superfície de saída dos furos para todas as condições testadas. Os valores registrados de altura da rebarba de saída atingiram valores de até 1 mm.

Em ensaios com aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta os valores da altura da rebarba foram menores que 135 μm . Para a condição de aplicação de MQF pelo interior da ferramenta, a ordem de grandeza obtida para a altura das rebarbas manteve-se abaixo de 300 μm .

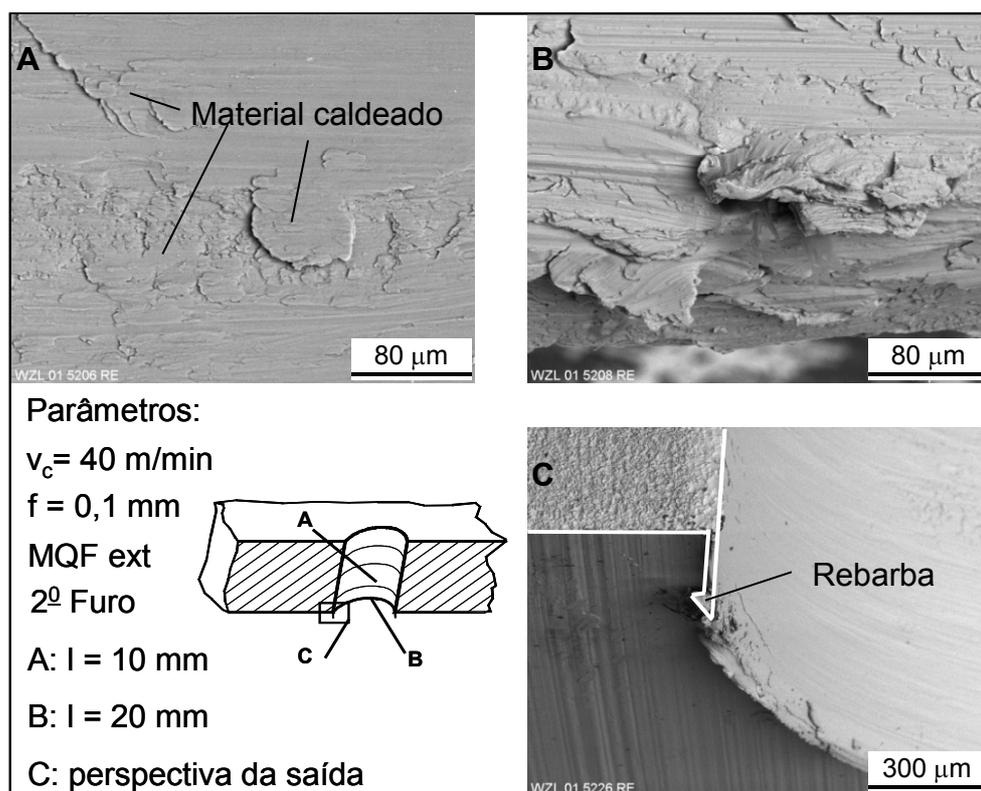


Figura 5. 53 – Detalhes da superfície do furo realizado com MQF aplicado por bicos externos

Na análise metalográfica de uma amostra de material da parede do furo, pôde ser comprovada a má qualidade da superfície usinada, obtida com o MQF aplicado por bicos externos pelas deformações plásticas e as escamas caldeadas sobre a superfície do furo, figura 5.54. A deformação plástica atingiu profundidades de até 50 μm .

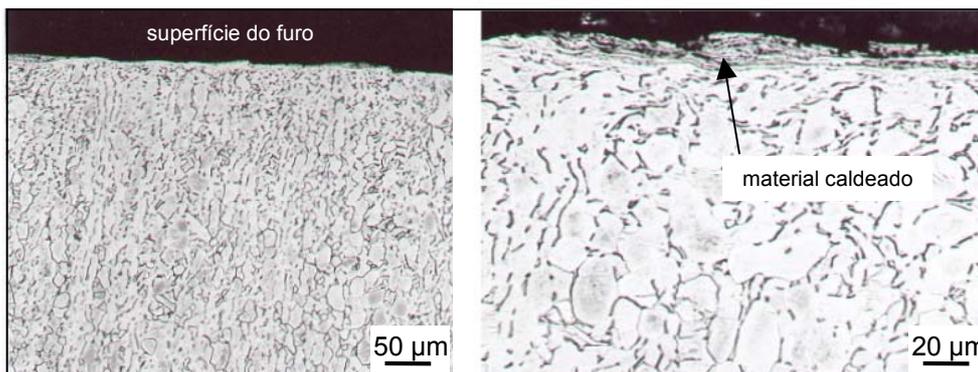


Figura 5. 54 – Detalhes da deformação plástica na furação com MQF aplicado por bicos externos em amostras de Ti6Al4V furadas com brocas helicoidais

Bons resultados obtidos com MQF aplicado por bicos externos foram medidos para o fresamento circular periférico. Nestes ensaios, os valores de deformação plástica medidos foram baixos, chegando a uma profundidade máxima de 10 µm. A figura 5.55 mostra a superfície de uma amostra metalográfica de material da parede do furo, e a deformação plástica gerada pela fresa.

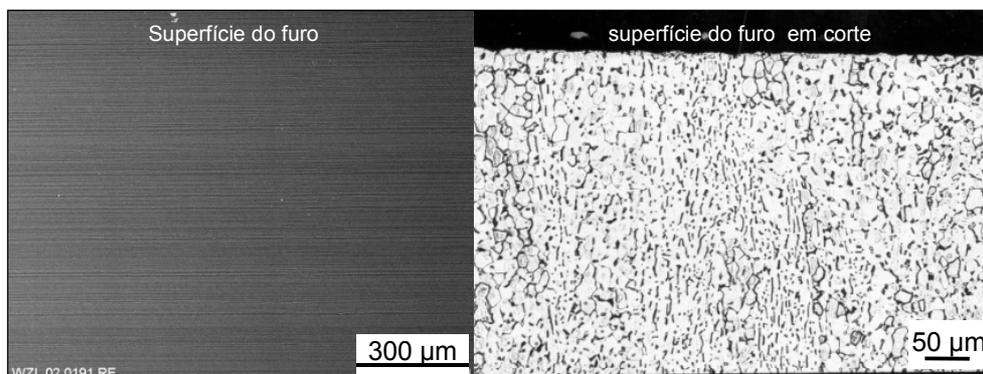


Figura 5. 55 – Detalhes da deformação plástica no fresamento com MQF aplicado por bicos externos em amostras de Ti6Al4V furadas com uma fresa de topo

Na avaliação da micro-dureza, medida em um corte normal à superfície, não foi possível averiguar uma influência do processo de fresamento sobre a camada limite. O penetrador e a não-homogeneidade do material tiveram uma influência maior sobre os valores de micro-dureza (HV0.01 e HV0.03) medidos, não permitindo uma análise clara da influência das solicitações térmicas e mecânicas sobre a camada limite no fresamento, figura 5.56.

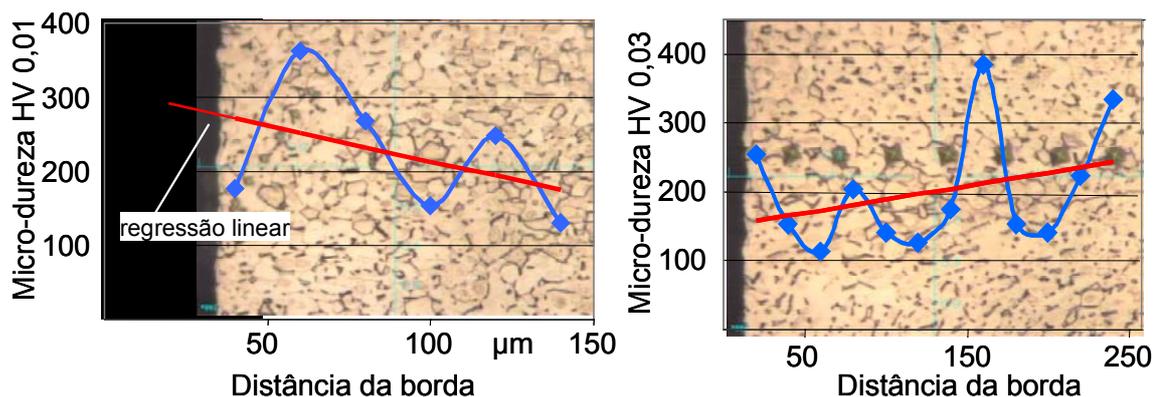


Figura 5. 56 – Micro-dureza HV0.01 e HV0.03 na camada sub-superficial fresada com aplicação de MQF por bicos externos em amostras de Ti6Al4V furados com uma fresa de topo

Na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta foram obtidos melhores resultados que os obtidos com MQF aplicado por bicos externos, sendo registrados valores de deformação plástica menores que 30 μm. Como a qualidade da superfície é melhor, pois está livre de material caldeado sobre a parede do furo, esta camada limite pode ser eliminada pelo processo posterior de alargamento.

A figura 5.57 mostra a superfície e as deformações plásticas de uma amostra de material da parede de furo realizado com MQF aplicado pelo interior da ferramenta, empregando a broca do tipo 25 modificada, conforme mostra a figura 5.19. Para este furo analisado foram medidos valores de deformação plástica máximos na ordem de 25 μm. Para esta ferramenta foram executados 19 furos utilizando parâmetros de corte próximos aos usuais da indústria (velocidade de corte $v_c = 30$ m/min e avanço $f = 0,10$ mm).

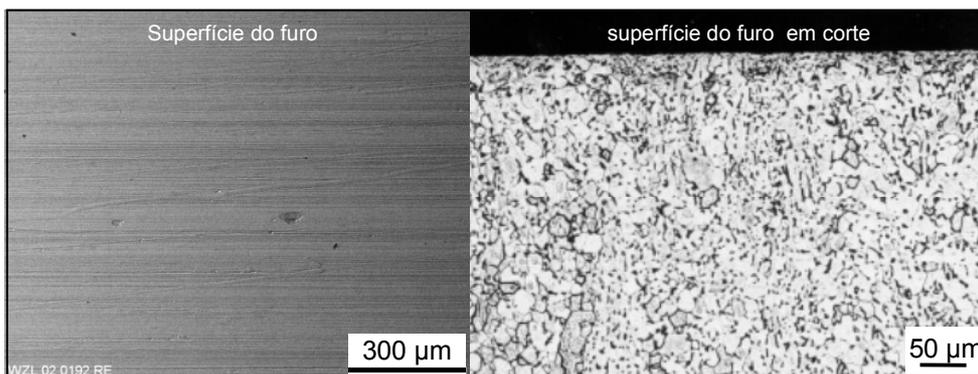


Figura 5. 57 – Detalhes da superfície usinada e das deformações plásticas do furo realizado com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta em amostras de Ti6Al4V furados com uma broca helicoidal do tipo 25

Para esta amostra de material houve muitas dificuldades para a realização de medição da micro-dureza da zona deformada plasticamente. Os valores medidos na estrutura do material base, isto é, afastado da região de corte em cerca de 300 µm, apresentaram uma variação de 200%. Uma identificação confiável do endurecimento da camada limite não foi possível. A figura 5.58 mostra a incerteza de medição na superfície furada com MQF aplicado pelo interior da ferramenta. À direita da figura, duas outras medições confirmam estas diferenças apresentadas. A explicação desta incerteza é a mesma já apresentada anteriormente para o resultado obtido nas medições da amostra fresada.

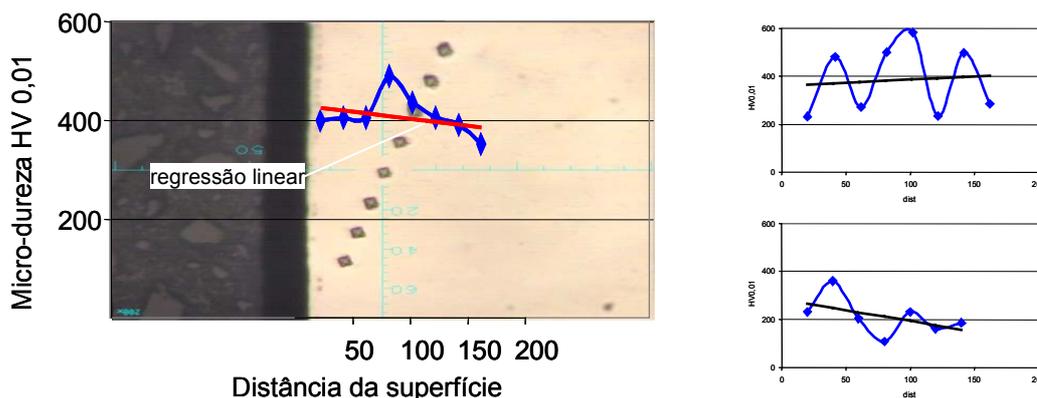


Figura 5. 58 – Micro-dureza da superfície de uma amostra tirada da parede de um furo realizado com MQF aplicado pelo interior da broca, com duas repetições

As deformações plásticas resultantes do processo de alargamento com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta também foram avaliadas. Para o processo de alargamento é importante o conhecimento da integridade da superfície gerada. A figura

5.59 mostra a superfície e as deformações plásticas de uma amostra de material retirado da parede do décimo furo alargado.

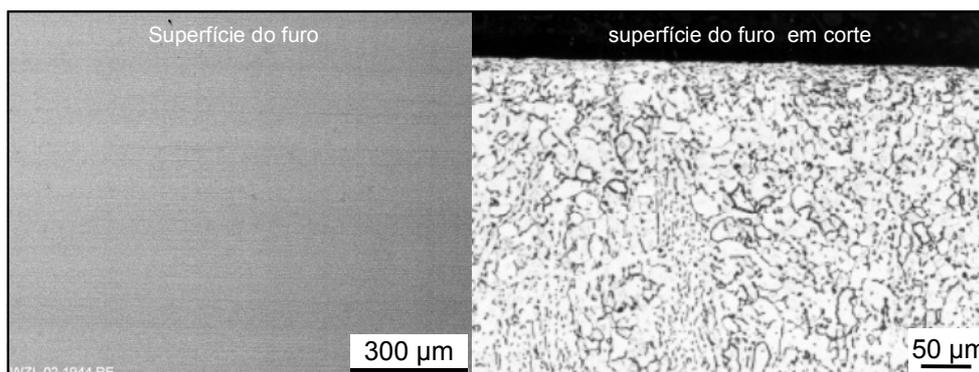


Figura 5. 59 – Detalhes da superfície usinada e das deformações plásticas para uma amostra de material retirado da parede do furo alargado com MQF aplicado pelo interior da ferramenta

As deformações plásticas registradas atingiram uma profundidade máxima de 15 µm. Conforme informação de especialistas de uma das empresas usuária desta liga, estes valores estão dentro dos níveis aceitáveis de deformação. Como mostrado na figura, não existe a formação de material caldeado sobre a superfície da parede do furo alargado.

Para o processo de alargamento, as dificuldades de medição da micro-dureza da camada limite foram ainda maiores. Isto ocorreu devido às menores influências do gume sobre o material, dificultando ainda mais uma análise para averiguar o endurecimento do material da camada limite.

EISENBLÄTTER [46] pesquisou em 1999 o efeito da zona afetada na superfície do furo sob a aplicação de MQF. Nestes ensaios foram registradas deformações plásticas e partículas de material caldeado sobre a superfície. Este material caldeado, chamado de uma forte “escama” de material, foi obtido na furação a seco de um aço equivalente ao SAE 1045.

WEINERT [85] cita que as zonas de deformações na superfície de furos realizados sem a presença de fluido lubri-refrigerante são induzidas termicamente. Afirma ainda que esta linha de deformação somente aparece quando existe uma ação con-

junta de fortes tensões térmicas e mecânicas. WEINERT [85] realizou vários ensaios para vários materiais, dentre eles o aço X6CrNiMoTi17-12-2.

Formação de micro-trincas na parede do furo

A formação de micro-trincas em superfícies usinadas por processos com remoção de cavaco pode ser um problema na manufatura de componentes críticos. Assim, como parte dos objetivos propostos por este trabalho, foram preparadas várias amostras das superfícies geradas pelas diversas condições de aplicação de fluido lubri-refrigerante para serem averiguadas. Após a usinagem, estas amostras foram selecionadas e analisadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura.

O maior número de furos avaliados foi para a condição de usinagem com aplicação de MQF. Na condição de aplicação de MQF por bicos externos, supostamente com a maior probabilidade de formação de micro-trincas, não foi verificado qualquer tipo de problema. Para a análise destas amostras, a grande quantidade de material caldeado sobre a superfície da parede do furo impossibilitou uma avaliação confiável (figuras 5.4 e 5.53).

Para as amostras de material da parede de furos usinados com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta, não foi verificada a existência de micro-trincas. Para esta condição de aplicação de fluido, as superfícies da parede dos furos estavam livres de partículas de materiais caldeado (figura 5.57).

A única trinca encontrada foi para a condição de emulsão aplicada em abundância pelo interior da ferramenta. Esta trinca foi registrada para uma velocidade de corte ligeiramente superior à usualmente adotada pelas empresas usuárias da liga de titânio Ti6Al4V. Conforme descrito, as velocidades de corte recomendadas estão na ordem de 30 a 40 m/min. A micro-trinca foi verificada em uma amostra de parede de um furo realizado com broca helicoidal do tipo 125, para uma velocidade de corte $v_c = 50$ m/min. A figura 5.60 mostra esta trinca.

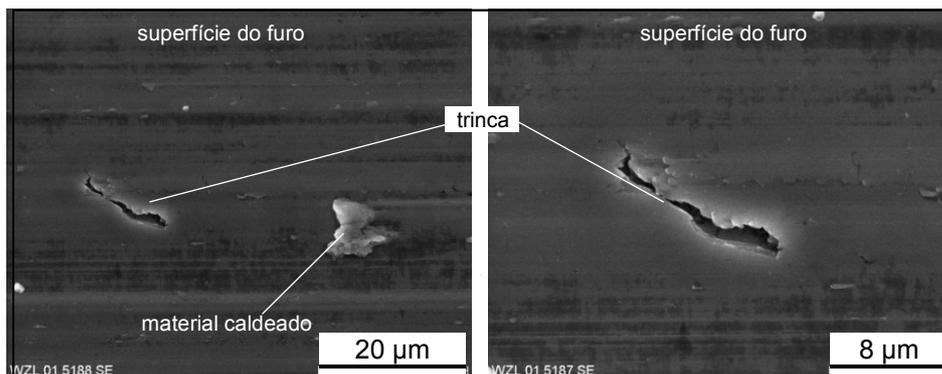


Figura 5. 60 – Micro-trinca em uma amostra da parede de um furo realizado com uma broca helicoidal do tipo 125, com emulsão aplicada em abundância pelo interior da ferramenta para uma velocidade de corte de 50 m/min

b) Efeitos sobre a forma do furo

Os efeitos sobre a forma dos furos foram avaliados pelo registro das grandezas: o diâmetro nominal, a circularidade e a cilindricidade do furo.

Diâmetro nominal

O diâmetro nominal dos furos foi medido para subsidiar uma melhor compreensão dos efeitos ocasionados pela aplicação de MQF. Com a eliminação do fluido lubri-refrigerante, que possui função primária de refrigeração, tem-se um aumento das temperaturas na região de corte. Este aumento de temperatura acarreta em uma dilatação da ferramenta de corte e da peça, conseqüentemente aumentando o furo resultante [98 - 101].

Para um melhor entendimento dos dados tecnológicos da usinagem com aplicação de MQF, primeiramente foram realizados ensaios para a condição de emulsão aplicada pelo interior da ferramenta. Para o diâmetro nominal, foi adotado um critério de verificação quantitativa da qualidade do furo, baseado na tolerância classe H8. Isto é, um furo é classificado como bom, quando este encontra-se dentro de uma tolerância D H8 (para o diâmetro D entre 6 e 10 mm, tem-se uma tolerância de $-0 + 22 \mu\text{m}$).

A figura 5.61 mostra o comportamento do diâmetro nominal para diferentes níveis de profundidade ($l = 3 \text{ mm}$, $l = 10 \text{ mm}$ e $l = 17 \text{ mm}$), para a condição de corte usualmente empregada pela indústria, velocidade de corte $v_c = 40 \text{ m/min}$ e avanço $f = 0,10 \text{ mm}$.

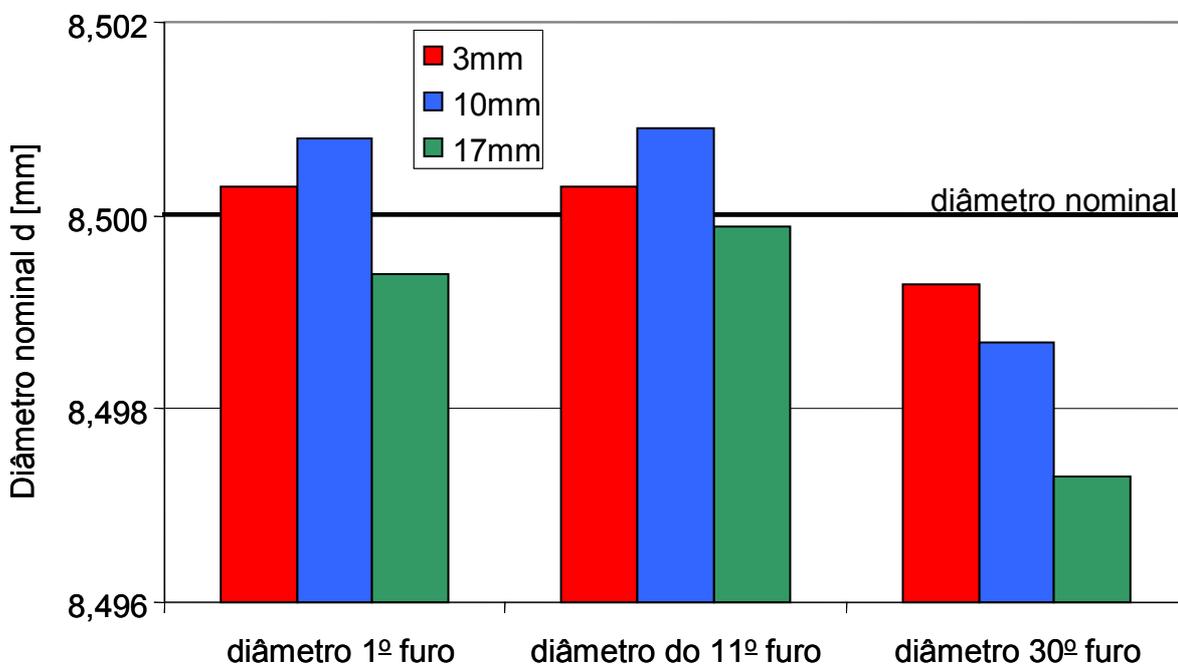


Figura 5. 61 – Evolução do diâmetro nominal para ensaios com emulsão aplicada pelo interior da ferramenta

Na medição do diâmetro nominal, pôde-se concluir que os furos permanecem num espectro próximo ao valor do diâmetro nominal $D = 8,50 \text{ mm}$. Este valor é mantido com um desvio de $10 \mu\text{m}$. Porém, o desvio apresentado é negativo e não positivo como o classificado pela tolerância classe H para furos. Neste caso, o desvio está enquadrado em uma tolerância classe N9 [124]. Pode ser visto também que o diâmetro do furo apresentou uma redução como função do número de furos executados. Esta diminuição é inferior a $0,1\%$ e, para quase todas as medições, os maiores valores medidos encontram-se a uma profundidade de 10 mm da superfície. A redução do diâmetro é relacionada com o desgaste do gume secundário.

Em ensaios realizados com MQF aplicado por bicos externos, foram medidos os maiores picos de temperatura na peça. Nestes ensaios, os diâmetros nominais registrados também são maiores que os obtidos com emulsão aplicada pelo interior da ferramenta. A figura 5.62 mostra o comportamento do diâmetro nominal em função

do revestimento da broca, para uma velocidade de corte de 30 m/min e um avanço de 0,10 mm.

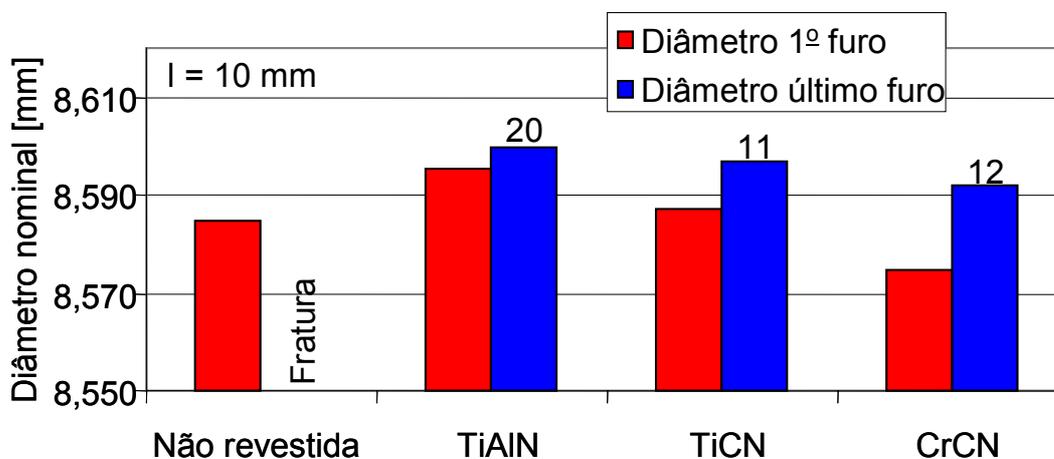


Figura 5. 62 – Diâmetro nominal do furo em função do revestimento da broca do tipo 105, na furação com MQF aplicado por bicos externos

Para todos os diâmetros nominais medidos nestes ensaios, inclusive para outras velocidades de corte, os valores se encontram acima da tolerância pré-estipulada D H8. Foram atingidos valores de diâmetro dentro da faixa de 8,530 até 8,612 mm. Isto significa que, os furos apresentaram valores de até 112 μm acima do diâmetro nominal teórico (superior a uma tolerância classe H11).

Os maiores diâmetros foram medidos para a broca do tipo 105 revestida com TiAlN. Para este revestimento, com características refratárias (menor coeficiente de condutividade térmica), foram também medidos os valores mais elevados de rugosidade (figuras 5.50 e 5.51).

Nos ensaios realizados com MQF aplicado pelo interior da ferramenta, para a broca do tipo 25, modificada (figura 5.19), os resultados da evolução do diâmetro nominal ao longo do número de furos estão apresentados na figura 5.63.

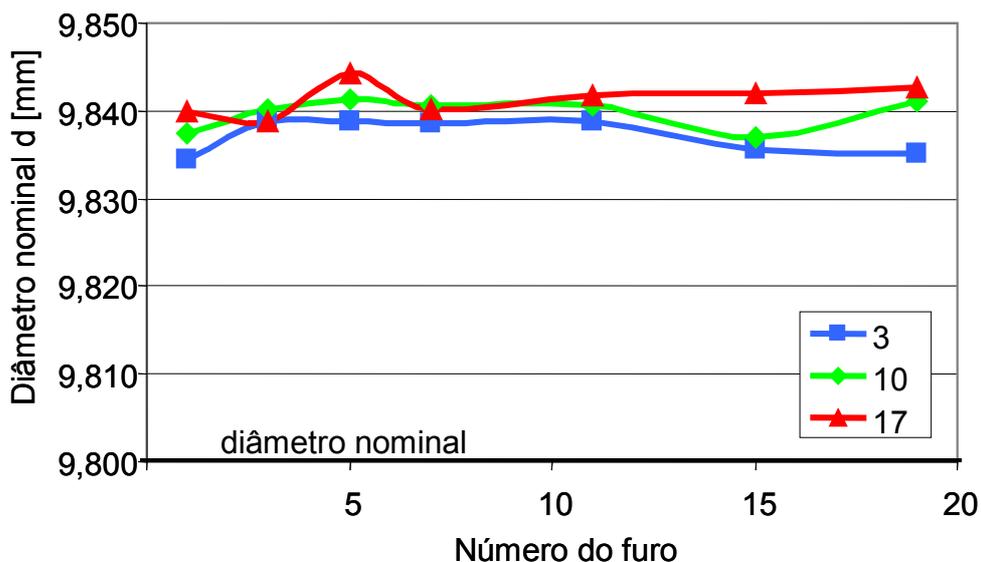


Figura 5. 63 – Evolução do diâmetro nominal na usinagem com MQF aplicado pelo interior da ferramenta com a broca do tipo 25 modificada

Para a furação com MQF aplicada pelo interior da ferramenta, os valores do diâmetro nominal ultrapassaram o diâmetro nominal em até 45 μm e encontram-se dentro de uma tolerância classe D H9 ($D = 9,80 + 45 \mu\text{m}$). Este aumento do diâmetro é resultante do aumento da temperatura na região de corte. Como a temperatura gerada é superior que a obtida com emulsão aplicada pelo interior da ferramenta, tem-se então uma maior dilatação da broca e, conseqüentemente, um maior diâmetro. Para os ensaios realizados com MQF aplicado por bicos externos, pode ser concluído que a diferença apresentada no aumento do diâmetro também está associada a maior temperatura registrada em processo.

Nos ensaios com alargadores de gume único regulável, com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta, os diâmetros nominais permaneceram dentro da tolerância classe D H7 ($-0 +15 \mu\text{m}$), pré-estipulada.

Para o fresamento circular com uma fresa de topo empregando MQF aplicado por bicos externos, o diâmetro nominal permaneceu na ordem de 90 μm abaixo do diâmetro nominal teórico ($D = 10 \text{ mm}$). O furo apresentou um menor diâmetro final ($D = 9,910 \text{ mm}$). O diâmetro pode ser corrigido pela correção do diâmetro nominal da fresa no programa CNC.

Circularidade e cilindricidade do furo

A circularidade e a cilindricidade de um furo podem representar um papel importante no controle do processo de fabricação. Esta importância é determinada pelas características funcionais do furo. Para casos onde estas características possuem um importante papel, estes são avaliados por uma margem de erro pré-estabelecida. A margem de erro admissível e pré-estabelecida neste trabalho, correspondente a um limite adotado pelas empresas usuárias da liga de titânio Ti6Al4V, é de 22 μm .

Para a análise da circularidade, foram avaliados os registros gráficos dos erros de forma do furo. Em todos os ensaios, a circularidade foi medida em três diferentes profundidades do furo: 5, 10 e 17 mm, permitindo verificar, além da circularidade também a tendência do erro de cilindricidade. Adotando-se esta sistemática, é possível averiguar, de uma forma confiável, a tendência apresentada pelo perfil do furo.

A figura 5.64 mostra o registro de circularidade obtido na furação com MQF aplicado por bicos externos, com uma broca do tipo 105.

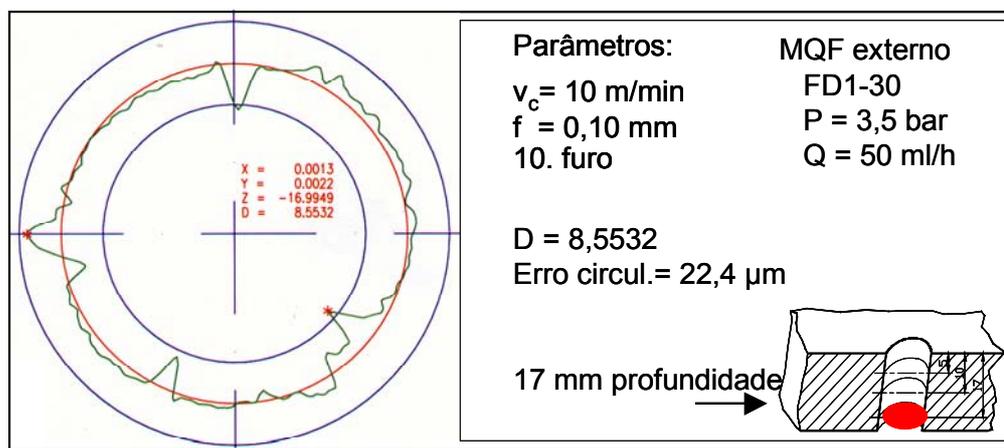


Figura 5. 64 – Registro de circularidade do furo na furação com MQF aplicado por bicos externos com uma ferramenta do tipo 105

Na furação com aplicação de MQF por bicos externos, o erro de circularidade admissível, de 22 μm , foi ultrapassado para grande parte dos furos realizados. Os erros de circularidade registrados permaneceram na faixa de 100 μm , isto é, erros mais que quatro vezes maiores que o erro pré-estipulado. Para entender este com-

portamento do erro de circularidade, os registros foram comparados com a análise visual de superfícies de furos. Constatou-se que os picos dos desvios de circularidade estavam diretamente correlacionados com micro-caldeamentos na superfície do furo, como mostrado na figura 5.65.

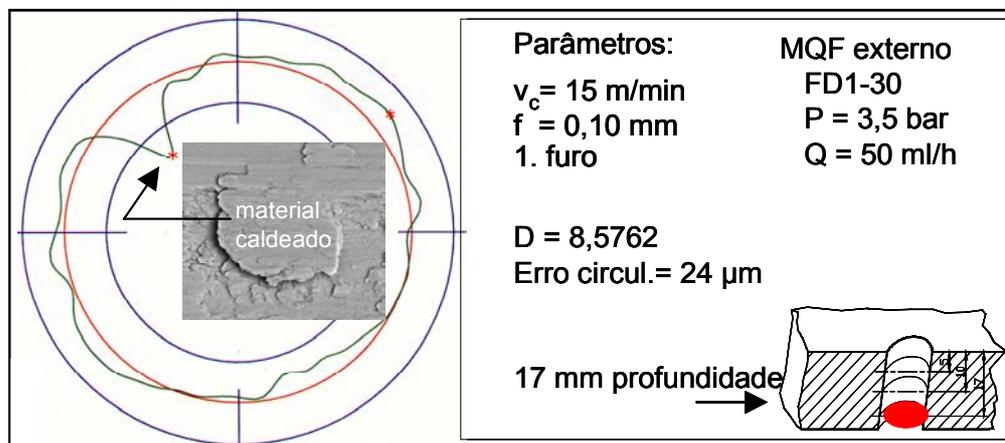


Figura 5. 65 – Interpretação gráfica do material caldeado sobre a superfície de um furo realizado sob aplicação de MQF por bicos externos

Particularmente este furo apresenta um erro de circularidade pequeno, com poucos caldeamentos, e que reforçam a conclusão de que os caldeamentos são os principais responsáveis pelos grandes erros de circularidade. A forma ondulada do registro não apresenta uma correlação clara com estes defeitos de superfície.

Mudando os revestimentos das ferramentas, para influenciar a condição de atrito entre a guia e a parede do furo, não se pode constatar uma tendência diferenciada para o comportamento do desvio de circularidade dos furos usinados.

A figura 5.66 mostra os resultados do erro de circularidade verificado em furos realizados com brocas com diversos revestimentos. Não foi possível constatar uma tendência clara do comportamento e obteve-se uma grande dispersão dos resultados, decorrente principalmente da presença de caldeamento sobre a parede dos furos. Com o aumento do número de furos realizados, o erro de circularidade apresenta uma tendência de aumentar. Mas também aqui não se constatou uma tendência clara, mascarada pela dispersão dos resultados.

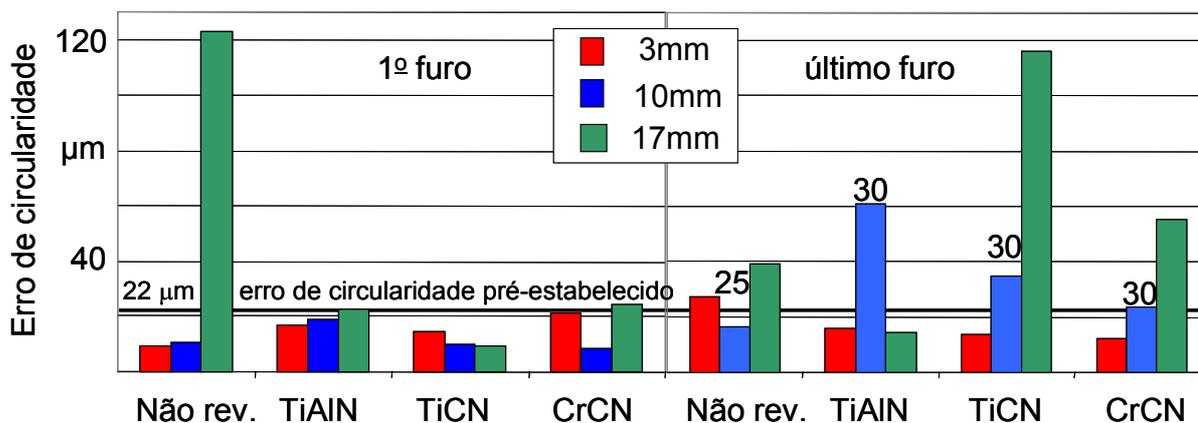


Figura 5. 66 – Erro de circularidade do furo obtido com uma broca do tipo 105 sem e com diferentes revestimentos e com MQF aplicado por bicos externos

Em relação à cilindricidade apresentada para os ensaios com aplicação de MQF por bicos externos, pôde ser concluído que estes apresentam uma forma bem característica. Para baixas velocidades de corte, para quase todas as ferramentas, os furos apresentaram um aumento do diâmetro para maiores profundidades, denominado de forma de sino [98 - 101]. A forma de sino dos furos pode ser explicada pela elevada temperatura na furação da liga de titânio Ti6Al4V. No início da furação a broca e a peça apresentam uma temperatura baixa. À medida que a broca penetra furando ocorre o aquecimento da broca e do material da peça. A broca aquece mais na parte frontal, levando a um aumento do diâmetro da parte cortante da broca. A região que está sendo usinada sofre um aumento de temperatura localizado. O aumento do volume de material aquecido leva a tensões de compressão na região aquecida e de tração nas regiões frias. Estas tensões estão em perfeito equilíbrio. Desta forma, a expansão do material da peça se desloca no sentido do eixo do furo, pois o material aquecido é impedido de se expandir no sentido do material circunvizinho mais frio. O aumento do diâmetro da broca assim como a diminuição do diâmetro do furo pelo aquecimento localizado levam a uma remoção complementar de material, de forma que após o resfriamento da peça se observa uma forma de sino.

Para pequenas profundidades, quando a broca e a peça estão relativamente frias, os desvios são pequenos. À medida que a profundidade dos furos aumentam estes desvios também aumentam. A figura 5.67 mostra este comportamento para o primeiro furo realizado no corpo de provas frio com MQF aplicado externamente.

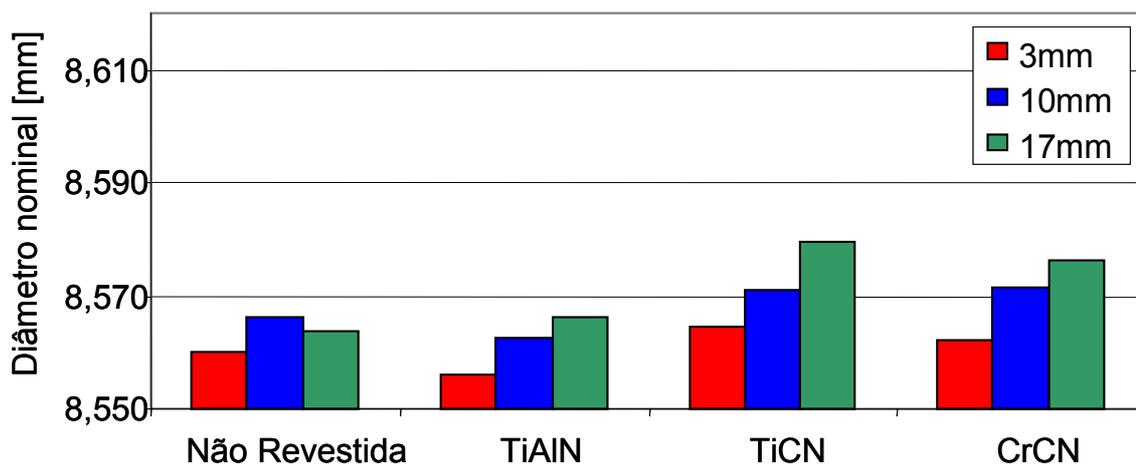


Figura 5. 67 – Diâmetro nominal do furo para três diferentes níveis de profundidade na furação com MQF aplicado por bicos externos com uma broca do tipo 105

Independentemente do revestimento esta tendência se comprova. Quando se realiza um maior número de furos no mesmo corpo de provas, o aquecimento do mesmo é acentuado, a quantidade de fluido de corte aplicado não é suficiente para restabelecer a temperatura inicial e os gradientes de temperatura se tornam menos acentuados. Não é mais possível seguir a tendência observada no primeiro furo, figuras 5.68 e 5.69. Além disto o maior desgaste das ferramentas também prejudica uma análise mais clara deste mecanismo.

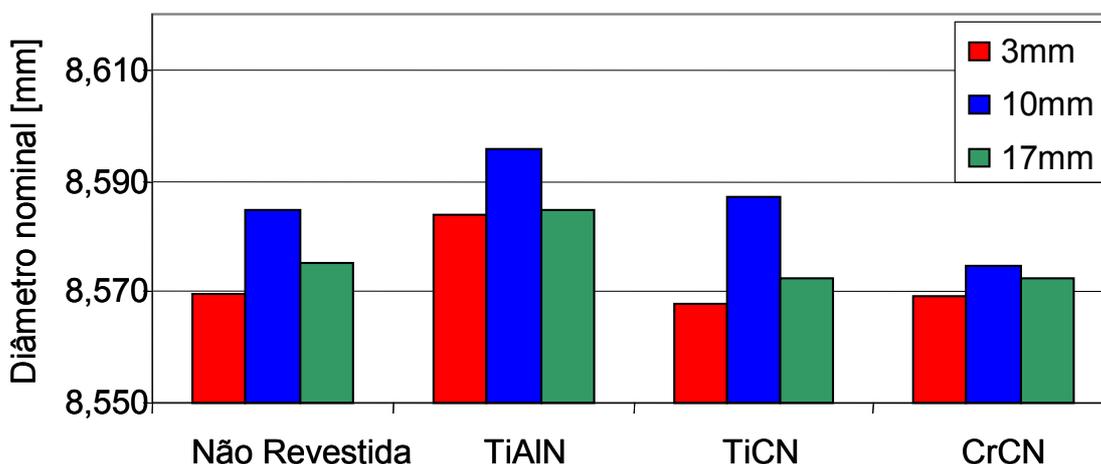


Figura 5. 68 – Cilindricidade medida no segundo furo para uma velocidade de corte $v_c = 30$ m/min com MQF aplicado por bicos externos à ferramenta do tipo 105

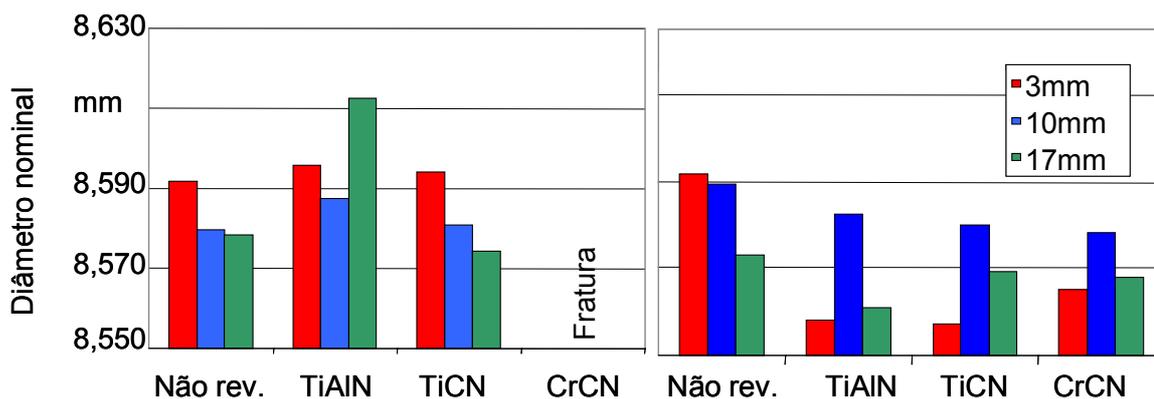


Figura 5. 69 – Cilindricidade para o décimo furo realizado pela broca do tipo 105 com aplicação de MQF por bicos externos, para as velocidades de corte de 15 e 30 m/min

A tendência de aumento do diâmetro dos furos feitos seqüencialmente também pode ser correlacionada com o mecanismo anteriormente descrito. O aumento da temperatura decorrente do maior atrito com o maior desgaste leva a maiores gradientes de temperatura e, conseqüentemente, a maior remoção de material no furo. Além disto, devido ao desgaste desigual das partes cortantes da broca, a rotação centrada observada para a broca nova não é mais garantida e o batimento na rotação da broca leva a um aumento crescente do diâmetro dos furos realizados.

Em uma avaliação genérica da forma dos furos, considerando todos os fatores que afetam a cilindridade, a única tendência clara que foi apresentada para todas as condições de usinagem é o aumento do diâmetro do primeiro para o último furo. Este aumento apresentou-se em média 0,16%.

Em ensaios com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta, com brocas do tipo 125 e do tipo 25, verificou-se uma melhora significativa da circularidade do furo, quando comparados aos resultados obtidos com MQF aplicado por bicos externos. Os valores medidos encontram-se na grande maioria dentro da faixa de 22 μ m. Este resultado é correlacionado com as modificações da brocas, que foram realizadas para reduzir o atrito. A redução da largura das guias e os chanfros entre os flancos, bem como o micro-polimento do gume, realizados para diminuir o contato entre as partes cortantes da ferramenta e a parede do furo em execução, podem ser os responsáveis pela redução das temperaturas e conseqüentemente pelos menores erros de circularidade obtidos. Alguns autores [103 - 106] indicam que são necessárias

condições apropriadas de geometria e, em dependência do tipo de broca utilizada nos ensaios, podem ser obtidos baixos erros de circularidade de furos. A figura 5.70 mostra um registro de circularidade obtido nos ensaios empregando a broca com um diâmetro de 9,8 mm com micro-polimento do gume (broca do tipo 25).

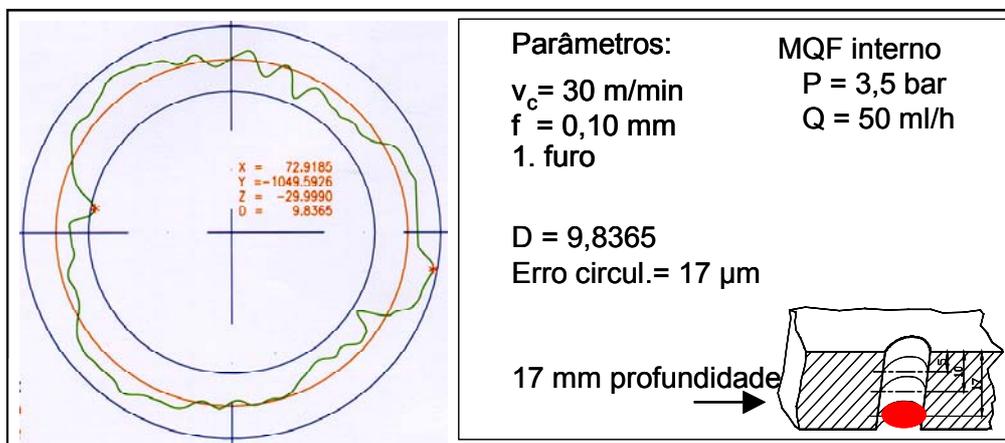


Figura 5. 70 – Registro de circularidade do furo tipicamente obtida na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta

A figura 5.71 apresenta o resultado dos diâmetros nominais medidos para três profundidades: l = 5 mm, l = 10 mm e l = 17 mm.

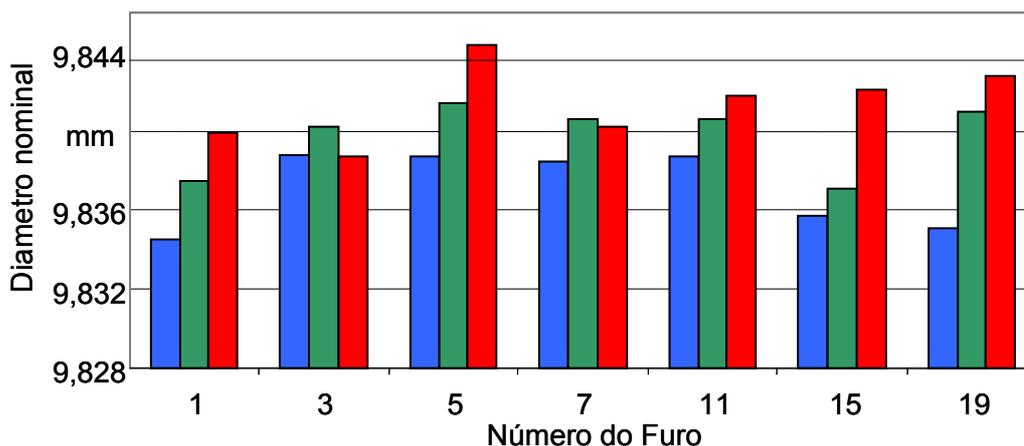


Figura 5. 71 – Cilindricidade do furo para a furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta do tipo 25

A cilindridade dos furos obtidos com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta apresentam a tendência da forma de sino para quase a totalidade dos furos execu-

tados. Verifica-se que a lubrificação pelo interior da ferramenta, já para mínimas quantidades de fluido de corte, é suficiente para restabelecer a temperatura, apresentando a forma de sino mesmo com o aumento do número de furos realizados. As modificações realizadas nestas ferramentas propiciaram a melhor lubrificação pelo interior da broca. O melhor resultado também foi comprovado pelo expressivo aumento do número de furos executados, de 5 para 19 furos, como também pela melhora da qualidade da rugosidade (figura 5.49) e da circularidade registrada.

No alargamento com MQF aplicado pelo interior da ferramenta, os resultados obtidos de circularidade também foram positivos. A tolerância pré-estipulada, H7, foi obtida para todos os ensaios desenvolvidos. A figura 5.72 apresenta um registro de circularidade obtido para a ferramenta de gume único regulável com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta, para uma velocidade de corte de 15 m/min e um avanço de 0,10 mm.

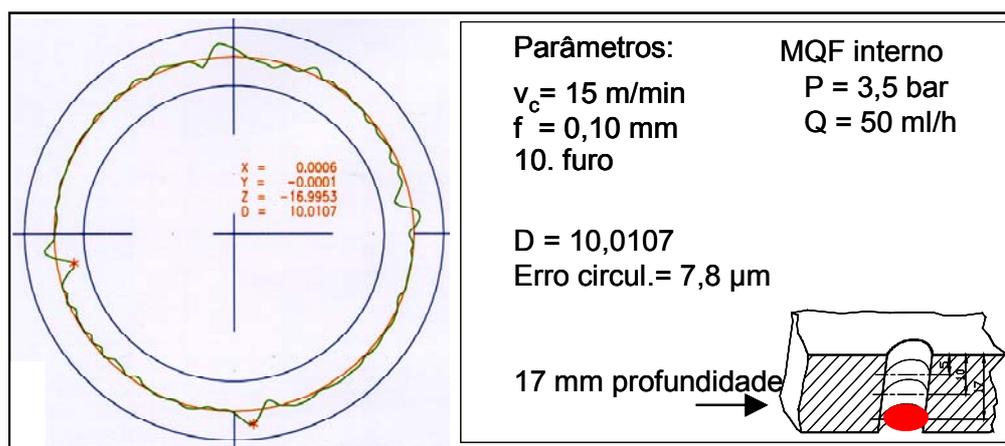


Figura 5. 72 – Registro de circularidade de um furo alargado com MQF aplicado pelo interior da ferramenta de alargar

Para o fresamento circular com aplicação de MQF por bicos externos, o registro da circularidade pode ser visto na figura 5.73. O erro da circularidade foi de 38 µm, ultrapassando a tolerância pré-estabelecida.

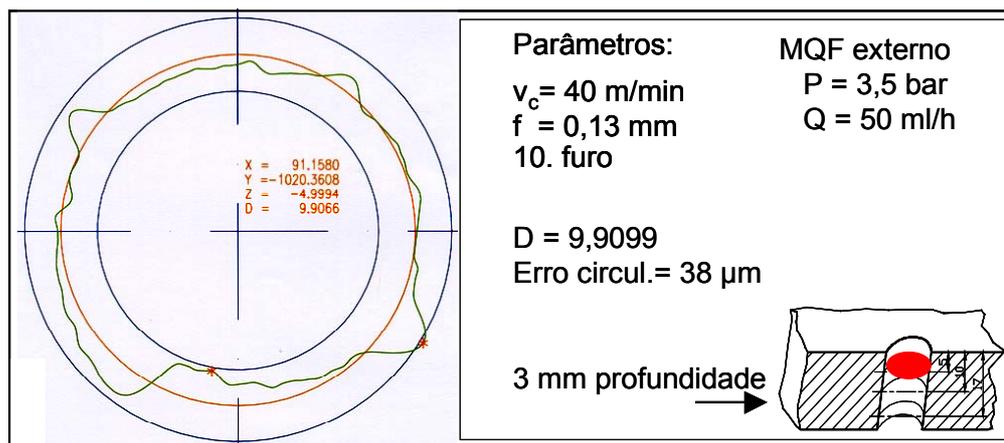


Figura 5. 73 – Circularidade de uma cavidade obtida no fresamento circular periférico com aplicação de MQF por bicos externos

O baixo diâmetro nominal e o grande erro de circularidade apresentado para o fresamento circular periférico podem estar relacionados com a estratégia adotada no ensaio de fresamento periférico, figura 4.6. A estratégia designada para a entrada e a saída da fresa, com aumento e redução progressivo das espessuras de material em remoção (entrada e saída em 180°) pode ter propiciado variação das grandezas dos esforços de usinagem. Com estes diferentes carregamentos mecânicos, tem-se distintos esforços de reações do material e da ferramenta, promovendo indesejáveis flexões na fresa de topo e na parede do furo realizado.

Para melhor elucidar os resultados obtidos sobre as características da forma dos furos usinados, resultante das elevadas temperaturas, faz-se necessário um estudo das solicitações térmicas sobre a peça e sobre a broca. Para o estudo dos gradientes de temperatura, tanto na peça quanto na ferramenta, é necessária a realização da medição da temperatura em diferentes pontos, no caso da peça, ao longo da profundidade do furo. Apenas assim poderá ser comprovada a real eficiência das modificações realizadas nas geometrias das ferramentas, como o micro-polimento dos gumes e a redução da largura das guias, bem como a redução da temperatura com a aplicação de MQF em relação à furação a seco.

Faz-se necessária a medição da temperatura na ferramenta próximo ao gume, permitindo assim avaliar a ordem de grandeza dos gradientes de temperatura desde o início do corte, onde o gume se encontra frio, até o final da furação, registrando o

comportamento da evolução da temperatura e a geração das maiores temperaturas na ponta cortante da ferramenta.

A medição da temperatura na peça deve ser realizada para diferentes profundidades, numa região próxima à passagem do gume, permitindo assim averiguar e quantificar as conclusões estabelecidas no capítulo anterior, que mostram o aumento progressivo das temperaturas para maiores profundidades de corte, verificando também o efeito do lubrificante para mínimas quantidades de fluido de corte. Com a avaliação da temperatura empregando diferentes revestimentos, deve ser verificada a pequena contribuição dos mesmos sobre a redução da temperatura em processo, registrada nos resultados apresentados anteriormente.

5.3 Solicitações Térmicas sobre a Ferramenta e a Peça

Na furação a seco e com mínimas quantidades de fluido de corte as funções de refrigeração ou estão ausentes, ou são desprezáveis em relação ao efeito de refrigeração obtido com quantidades normais (abundantes) de fluido lubri-refrigerante. Conseqüentemente as solicitações térmicas devem ser maiores, tornando maiores os problemas numa transferência de tecnologia da usinagem convencional com fluido em abundância para a usinagem a seco ou com MQF [1, 6 – 7, 37, 46 – 47, 62]. Para a melhor compreensão da furação com redução da quantidade de fluido lubri-refrigerante é necessária a avaliação das solicitações térmicas sobre a ferramenta e sobre a peça. O problema das elevadas temperaturas em processo deve ser ainda mais crítico na usinagem de ligas de titânio, que apresentam características térmicas inadequadas para a usinagem, conforme apresentado na tabela 4.1.

GRANDEZAS TECNOLÓGICAS INFLUENTES SOBRE

5.1. Eduardo.....

5.2. Eduardo.....

5.3. Solicitações Térmicas sobre a Ferramenta

Figura 5. 1Figura 5. 2Figura 5. 3Figura 5. 4Figura 5. 5Figura 5. 6Figura 5. 7Figura 5. 8Figura 5. 9Figura 5. 10Figura 5. 11Figura 5. 12Figura 5. 13Figura 5. 14Figura 5. 15Figura 5. 16Figura 5. 17Figura 5. 18Figura 5. 19Figura 5. 20Figura 5. 21Figura 5. 22Figura 5. 23Figura 5. 24Figura 5. 25Figura 5. 26Figura 5. 27Figura 5. 28Figura 5. 29Figura 5. 30Figura 5. 31Figura 5. 32Figura 5. 33Figura 5. 34Figura 5. 35Figura 5. 36Figura 5. 37Figura 5. 38Figura 5. 39Figura 5. 40Figura 5. 41Figura 5. 42Figura 5. 43Figura 5. 44Figura 5. 45Figura 5. 46Figura 5. 47Figura 5. 48Figura 5. 49Figura 5. 50Figura 5. 51Figura 5. 52Figura 5. 53Figura 5. 54Figura 5. 55Figura 5. 56Figura 5. 57Figura 5. 58Figura 5. 59Figura 5. 60Figura 5. 61Figura 5. 62Figura 5. 63Figura 5. 64Figura 5. 65Figura 5. 66Figura 5. 67Figura 5. 68Figura 5. 69Figura 5. 70 Figura 5. 71Figura 5. 72 Figura 5. 73

Vários processos permitem medições de temperatura *in loco*. Os mais comuns são os que empregam termo-tintas, a termografia, a pirometria, as medições termo-elétricas, a calorimetria e, o mais usuais, os que empregam termo-elementos [4]. Com o termo-elemento, a medida de temperatura é feita por um sensor de medição preferencialmente embutido no objeto na qual se deseja determinar a temperatura. Para a medição de temperaturas estabilizadas, a medição com termo-elementos fornece excelentes resultados. Mas quando se deseja medir temperaturas transientes, o transdutor e a posição que o transdutor é montado na peça influenciam o resultado [107]. Em especial deve-se considerar a capacidade térmica dos termômetros, a situação de contato entre o termômetro e o objeto de medição e a velocidade de resposta dos termômetros [108].

O significado dos termo-elementos na prática industrial de medições de temperatura é de grande importância, desde muitos anos. Anualmente são fabricados milhões de termo-elementos e com o desenvolvimento da eletrônica as características destes foram melhoradas [109].

Recentemente foram desenvolvidos vários trabalhos [4, 37, 46, 110] na medição e mapeamento das temperaturas em processos de usinagem. KOPPKA [110] realizou ensaios para medir a temperatura de peças de liga de titânio para elevadas velocidades de corte, no torneamento.

5.3.1. Determinação da temperatura na ferramenta

Os métodos tradicionais de medição de temperatura na ferramenta de corte para o processo de furação adotam termo-elementos embutidos em uma broca fixa [4, 41, 46, 111 - 113]. Na grande maioria dos casos, a broca encontra-se fixada na contraponta de um torno, e a peça rotaciona presa à placa de castanhas. Entretanto, este método não representa um sistema real de furação. Para efetuar o ensaio com a peça em rotação, é necessário que a peça tenha uma forma de revolução, que permita a sua fixação sem maiores problemas. Na realidade, grande parte das peças

furadas, e mais especificamente a região próxima ao furo, possuem um formato prismático irregular, que apresenta um comportamento de distribuição e fluxo de calor totalmente diferente da peça cilíndrica (ou de revolução). Esta diferença foi a motivação principal para o desenvolvimento de um sistema de medição de temperatura com termopar embutido na broca.

Foi projetado e fabricado um sistema integrado para a medição de temperatura com a broca em rotação, empregando o conceito de telemetria. O conjunto de telemetria é composto pelo sistema emissor (montado na ferramenta e suporte da ferramenta) e o sistema receptor, ligado ao sistema de aquisição de dados e computador. Este sistema de telemetria é constituído de um emissor telemétrico da firma Datate1, que trabalha com um sistema multiplexador na base de tempo.

A figura 5.74 mostra os principais componentes do Sistema de Telemetria desenvolvido para a medição da temperatura na proximidade do gume, com a broca em rotação.



Figura 5. 74 – Principais componentes do Sistema de Telemetria desenvolvido para a medição da temperatura na broca em rotação

Os sinais dos termo-elementos embutidos nos furos para a refrigeração da broca são conduzidos até o emissor (figura 5.74 - 2). Este emite os sinais na forma de ondas de rádio (telemetria), que são recebidos por um receptor (figura 5.74 – 1). Devido ao sinal fraco e a ruídos ambientes a antena do receptor deve estar posicionada nas proximidades do sistema emissor. A figura 5.75 mostra o sistema posicionado para a furação, com o detalhe do posicionamento da antena receptora e dos bicos externos de atomização do fluido lubri-refrigerante, bem como um detalhe ampliado do posicionamento do termo-elemento dentro de um dos furos de refrigeração da ferramenta (figura 5.75, parte superior, à esquerda).

A preparação e o desenvolvimento dos experimentos se seguiu conforme uma metodologia própria para este ensaio. Os termo-elementos foram alojados dentro dos furos de refrigeração da broca, com o cuidado de não haver a danificação dos cabos, para que o sinal pudesse ser emitido sem ruídos. Com o apoio de uma seringa de injeção, foi injetada uma pasta termo condutora, na saída do furo de refrigeração

da broca, entre os termo-elementos e a parede do furo, permitindo assim uma melhor transmissão do calor ao termo-elemento, possibilitando uma melhor leitura das temperaturas.

O posicionamento dos sensores dos termo-elementos garante seu alojamento a uma distância de aproximadamente 0,5 mm do gume principal (figura 5.75).

As informações referentes à calibração do sistema de medição de temperatura na ferramenta estão no anexo II, item 9.1.

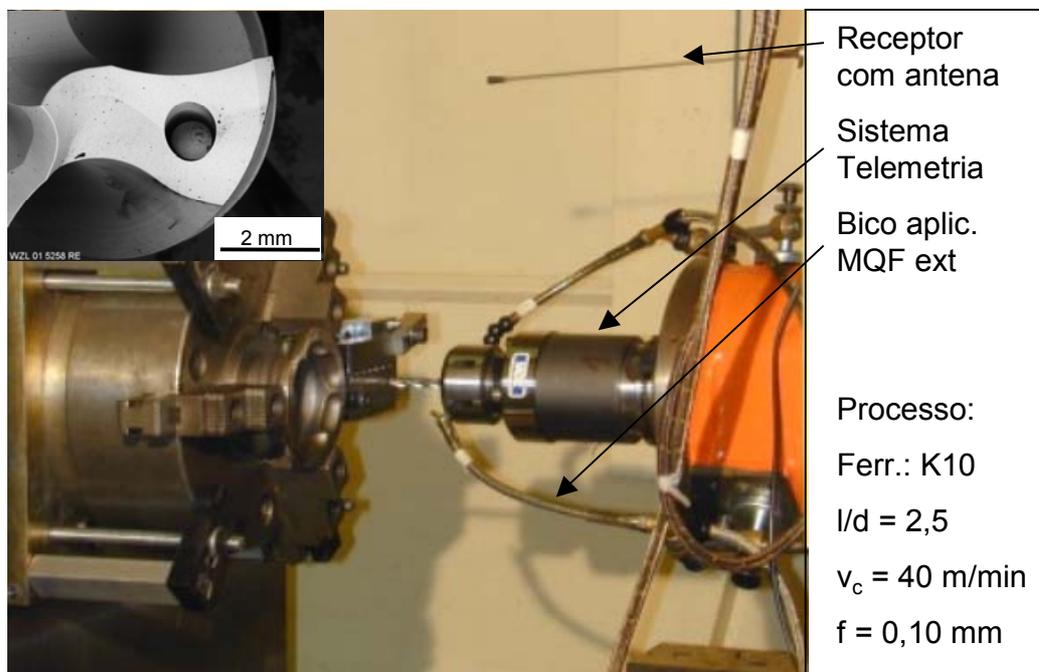


Figura 5. 75 – Sistema de Telemetria em processo, com posicionamento da antena receptora e dos bicos externos de atomização do sistema MQF

Os resultados de medição de temperatura com o emprego do sistema de telemetria apresentaram uma boa repetibilidade de valores. Com alguns ajustes iniciais de posicionamento e a correta calibração, o sistema não apresentou interferências durante o registro das temperaturas. Conforme informações do fabricante do emissor, poderiam surgir interferências, na forma de ruído, para elevadas rotações de trabalho. No entanto, devido às baixas velocidades de corte utilizadas para a furação de

ligas de titânio, os valores de rotação não atingiram estes valores críticos. Segundo o fabricante, este problema poderia surgir para rotações acima de 3000 rpm. A rotação máxima empregada nos ensaios foi inferior a 2000 rpm. Um dos limites encontrados para a boa recepção dos sinais de rádio foi o correto posicionamento da antena receptora. Para os ensaios realizados, concluiu-se que a antena deveria permanecer dentro de um raio máximo de afastamento de aproximadamente 500 mm do emissor. Como o emissor de sinais de rádio (figura 5.74 – 2) estava praticamente isolado dentro de uma carcaça metálica (figura 5.74 - 3) desenvolvida para o alojamento do emissor e das baterias, o sinal emitido apresentava-se muito fraco. Respeitando esta distância verificada, os sinais de rádio puderam ser captados satisfatoriamente pelo receptor, e amplificados e monitorados pelo *software* Diadem, preparado para o tratamento dos dados conforme calibração. Para o posicionamento da antena receptora em distâncias superiores a 500 mm ocorreram problemas de ruídos e interferências, dificultando a recepção dos sinais emitidos pelo emissor.

Os termo-elementos empregados para os ensaios foram do tipo K, com capacidade de medição de temperaturas até a ordem de 1100°C, fabricados pela empresa Thermocoax [114].

Os resultados das medições mostraram elevadas temperaturas alcançadas na proximidade do gume durante a furação com minimização de fluido lubri-refrigerante atomizado por bicos externos e a seco.

Para permitir o alojamento dos termopares na broca, teve-se que optar pela aplicação de fluido de corte externamente. Para a condição de emulsão abundante aplicada por bicos externos, os valores de temperatura foram também elevados, aproximadamente 88% dos obtidos com a aplicação de MQF por bicos externos.

A figura 5.76 mostra as temperaturas máximas registradas para as condições de aplicação de MQF e emulsão abundante aplicados por bicos externos e para a furação a seco, para três diferentes velocidades de corte. O avanço empregado nestes ensaios foi de 0,10 mm.

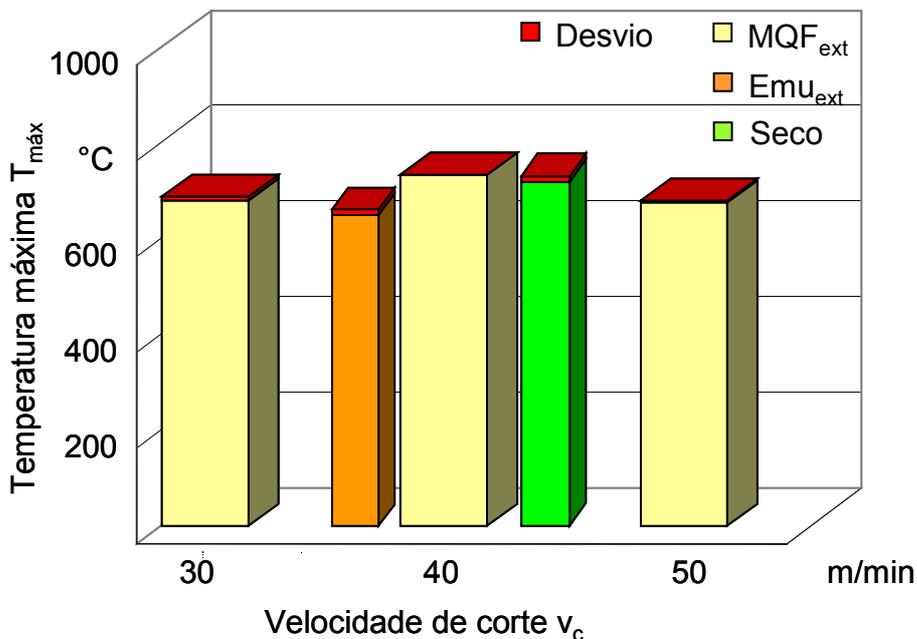


Figura 5. 76 – Máxima temperatura alcançada na proximidade do gume cortante para brocas do tipo 125

As médias das máximas temperaturas para aplicação de MQF aplicada por bicos externos e a seco não apresentaram diferenças significativas. Para MQF aplicado por bicos externos, a média das temperaturas máximas atingiu o valor de 736°C, e para a condição a seco chegou a 730°C. Entretanto, como a dispersão dos valores medidos foi de cerca de 13°C para as duas diferentes condições, estatisticamente não há diferença nas temperaturas medidas para os dois processos.

Para a condição de emulsão abundante aplicada por bicos externos, o valor médio da temperatura máxima alcançou os 647°C e uma dispersão de 14°C. Mostrou-se que, mesmo com a aplicação de emulsão por bicos externos, a emulsão consegue retirar boa parte do calor do gume. Para a condição de aplicação de emulsão por bicos externos, o problema apresentado foi o choque térmico sofrido pela broca ao sair do furo. Esta seqüência de choque térmicos gerou um aumento do desgaste de

flanco e também propiciou a formação de um lascamento prematuro do gume, como ocorrido nos ensaios mostrados na figura 5.77. O problema é agravado no caso de furação profunda, onde a ferramenta alcança maiores temperaturas, ou para sequência de furos curtos, onde há uma frequência maior de choques térmicos em um curto espaço de tempo.

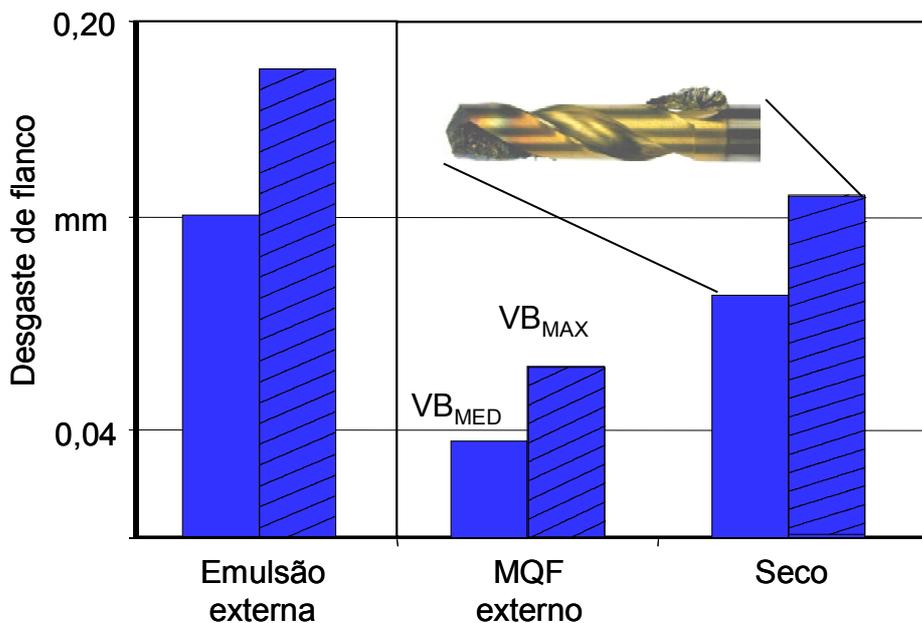


Figura 5. 77 – Desgaste da broca para três condições de aplicação de fluido lubrificante, com uma broca classe K10 revestida com TiN, para uma velocidade de corte de 30 m/min e um avanço de 0,10 mm

Para a condição de MQF aplicado por bicos externos, foi verificado o menor desgaste de flanco, resultante da melhor condição de equilíbrio entre o choque térmico ocorrido para a aplicação de emulsão e para a furação totalmente a seco, onde as temperaturas foram ligeiramente superiores.

Para a condição de furação a seco, o ensaio foi interrompido pela enorme formação de aderência de material sobre o gume e nos canais de transporte de cavaco (detalhe da broca na figura).

O conhecimento do gradiente da temperatura atingida na parte da broca permite avaliar as consequências destes sobre o resultado da furação.

As curvas de comportamento da temperatura no gume da broca para a furação com aplicação de MQF por bicos externos é mostrada na figura 5.78, e para a mesma abscissa mostra-se o comportamento da força de avanço F_f e do momento torçor M_t .

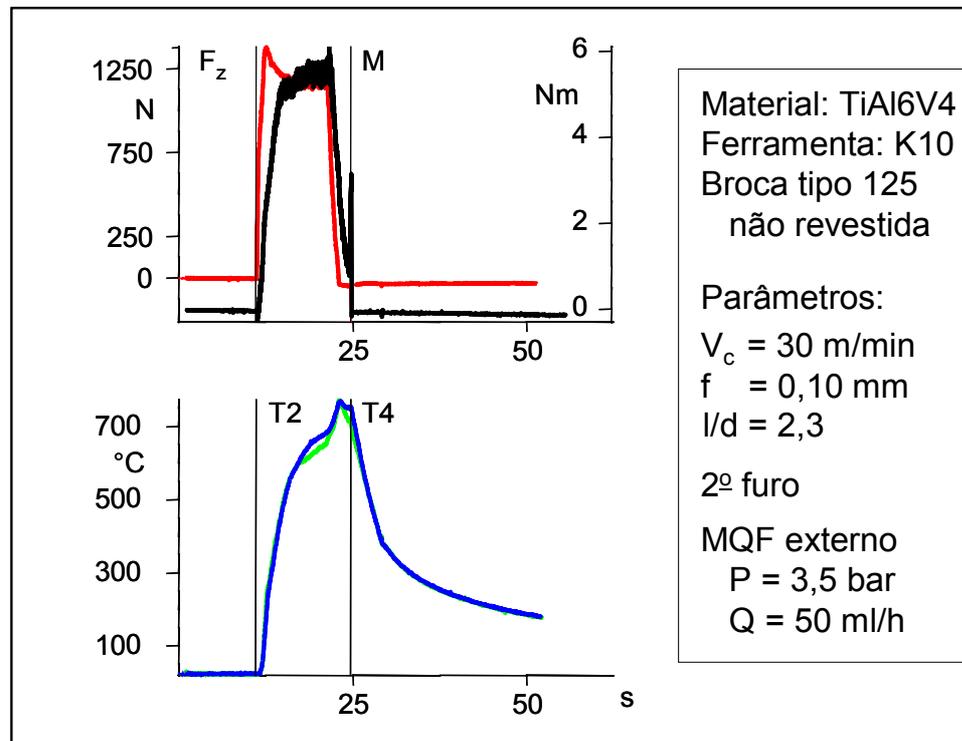


Figura 5. 78 – Comportamento da temperatura medida no gume da broca

A superposição dos resultados de medição do termopar T2 e T4 visa mostrar a boa repetibilidade nos resultados na mesma broca.

No ensaio de furação, iniciado com a broca fria, a temperatura aumenta decrescivamente. No final da furação verifica-se um aumento progressivo da temperatura, que é correlacionado com a progressiva obstrução dos canais de saída dos cavacos e a ausência total de fluido de corte na base do furo.

O comportamento apresentado pela força de avanço e pelo momento torçor foi típico para esta condição de aplicação de MQF aplicado por bicos externos. A força de avanço apresentou maiores valores no início do corte e com o aumento da temperatura houve uma sensível redução. O momento apresentou um comportamento

contrário, havendo um aumento dos valores à medida que ocorreu uma maior região de contato entre as guias e a parede do furo.

O comportamento da temperatura como função da velocidade de corte e com o emprego de MQF aplicado por bicos externos, para um avanço $f = 0,10$ mm, é apresentada na figura 5.79.

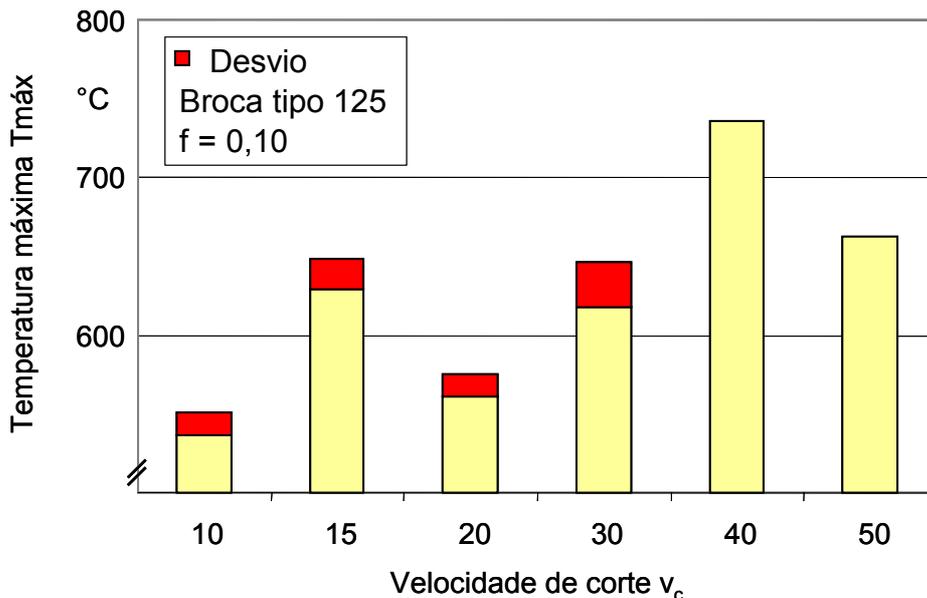


Figura 5. 79 – Temperatura na broca como função da velocidade de corte, para MQF aplicado por bicos externos

O comportamento das temperaturas máximas atingidas nos gumes como função da velocidade de corte não apresenta uma tendência semelhante à verificada na usinagem de aços em baixa velocidade de corte. Na faixa de 20 m/min verificaram-se as menores temperaturas devido às características do ângulo de saída mais positivo propiciado pela ausência dos gumes postiços. Com a ausência dos gumes postiços para velocidades de corte maiores, a temperatura apresenta uma tendência crescente.

A figura 5.80 mostra a variação da temperatura com o aumento do avanço, para a velocidade de corte de 15 e 30 m/min. Para o aumento do avanço, o aumento da temperatura foi verificada em todos os ensaios desenvolvidos.

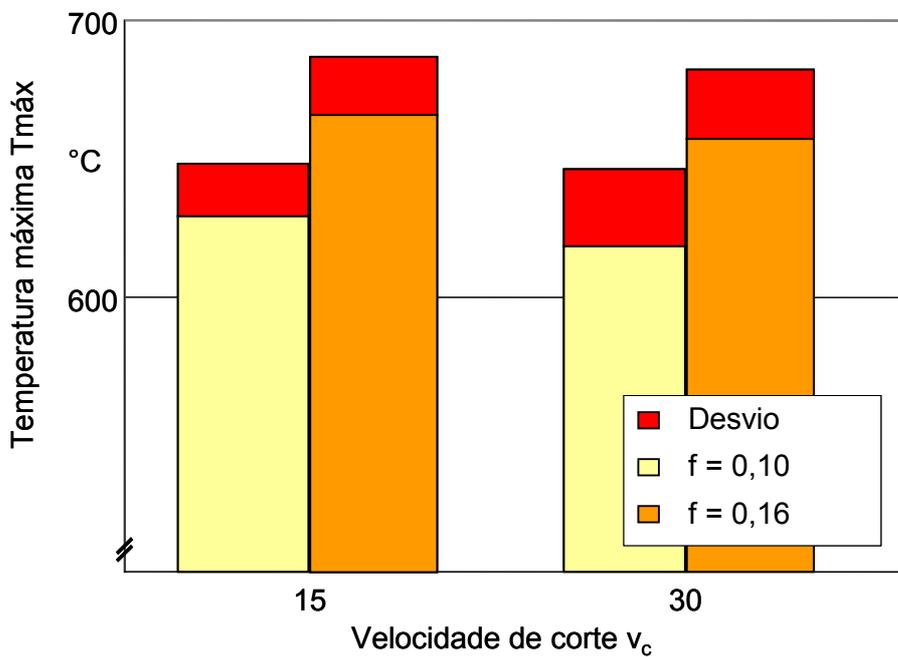


Figura 5. 80 – Máxima temperatura na broca para um aumento do avanço, de 0,10 para 0,16 mm, para MQF aplicado por bicos externos

O comportamento da temperatura na furação a seco, em função da variação da velocidade de corte, pode ser visto na figura 5.81.

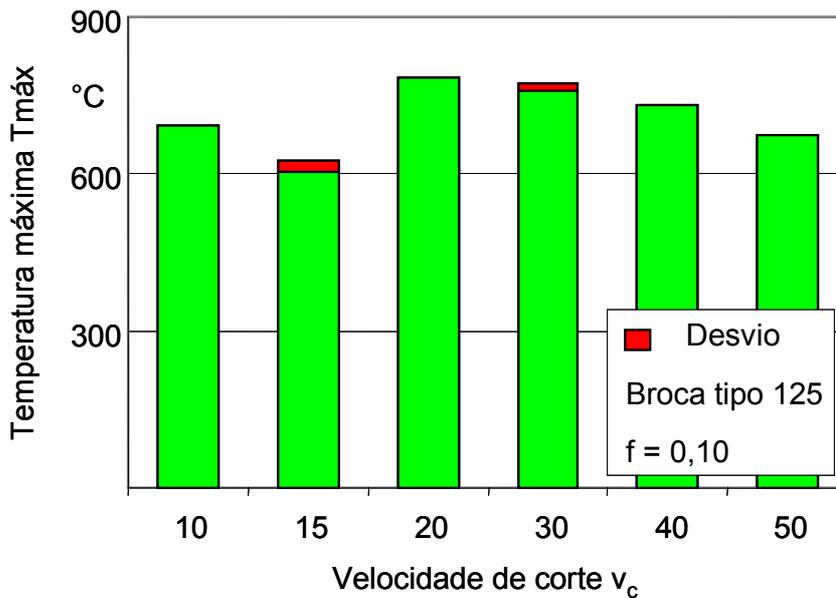


Figura 5. 81 – Máxima temperatura na broca como evolução da velocidade de corte, na furação a seco

Comparando o resultado da temperatura obtido na condição com MQF com os da furação a seco, verifica-se que o vale representativo para a formação de gumes postigos, se desloca para uma velocidade de corte mais baixa, característica também observada na usinagem dos aços [4], figura 5.82.

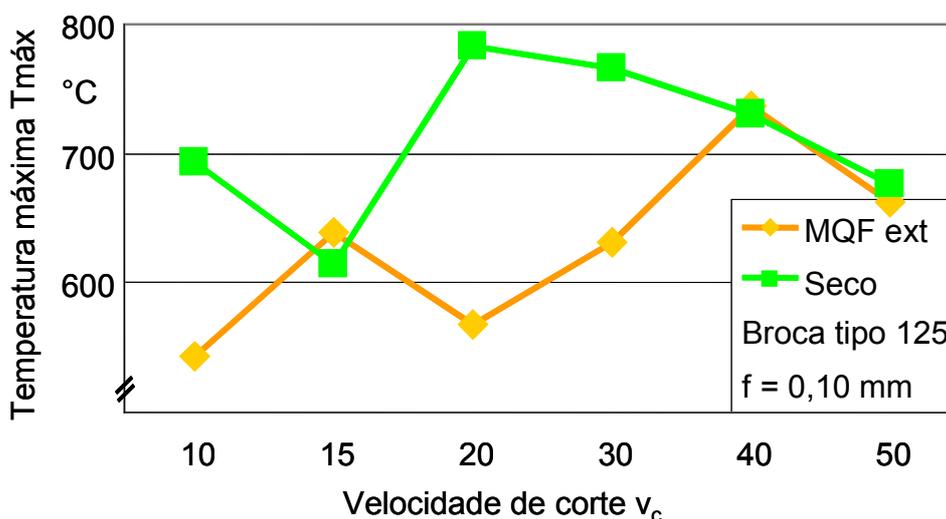


Figura 5. 82 – Sobreposição das curvas de comportamento de temperatura para MQF aplicado por bicos externos e a seco, ao longo do aumento da velocidade de corte

Este deslocamento da curva de comportamento das temperaturas como evolução da velocidade de corte pode ser explicado pelo efeito da lubri-refrigeração [4], resultante do filme de lubrificante aplicado com MQF por bicos externos. O vale de menor temperatura medido para a furação a seco com uma velocidade de corte de 15 m/min foi deslocado, para a furação com MQF, para uma velocidade de 20 m/min. Verifica-se que a partir de 40 m/min os resultados não apresentam mais diferença significativa. Para estas velocidades de corte as mínimas quantidades de fluido de corte não surtem mais efeitos sobre o processo.

A diminuição da temperatura medida para velocidades de corte acima de 30 m/min não pode ainda ser explicada de forma satisfatória.

A figura 5.84 mostra a comparação dos máximos valores de temperatura medidos para 2 diferentes concepções de brocas.

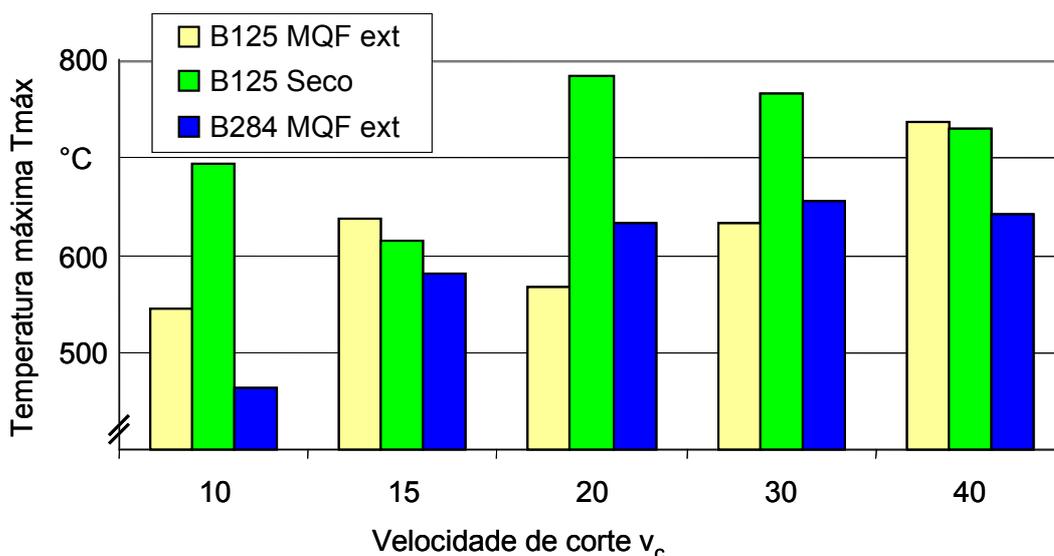


Figura 5. 83 – Temperatura para diferentes conceitos de broca

Os resultados indicam que para uma faixa de velocidade de corte de 20 a 30 m/min as ferramentas com 3 gumes (broca do tipo 125), apresentaram menores valores de temperatura máxima. Para as outras velocidades de corte testadas de 10, 15 e 40 m/min, a broca de 3 gumes apresentou maiores valores de temperatura máxima, em relação a broca de 2 gumes. Para estes ensaios, a diferenciação da temperatura ocasionada pelo número de gumes em corte não apresentou uma tendência clara. A

explicação para esta diferença dos resultados pode estar na concepção da geometria das brocas, que apresentam diferenças no gume transversal.

Para a broca do tipo 125, com 3 gumes, as guias são estreitas (aproximadamente 0,20 mm) e a broca apresenta uma região transversal pontiaguda (figura 5.10), que leva a um bom escoamento plástico do material da peça para a região da parte cortante do gume. Para esta broca houve uma maior dispersão dos valores obtidos para diferentes velocidades de corte.

A broca do tipo 284 é formada por dois gumes com guias de semelhante grandeza (aproximadamente 0,20) e uma região transversal com uma geometria não tão pontiaguda (figura 5.20). Para a ferramenta de 2 gumes houve uma tendência clara de um incremento dos valores de temperatura, como função do aumento da velocidade de corte, figura 5.84.

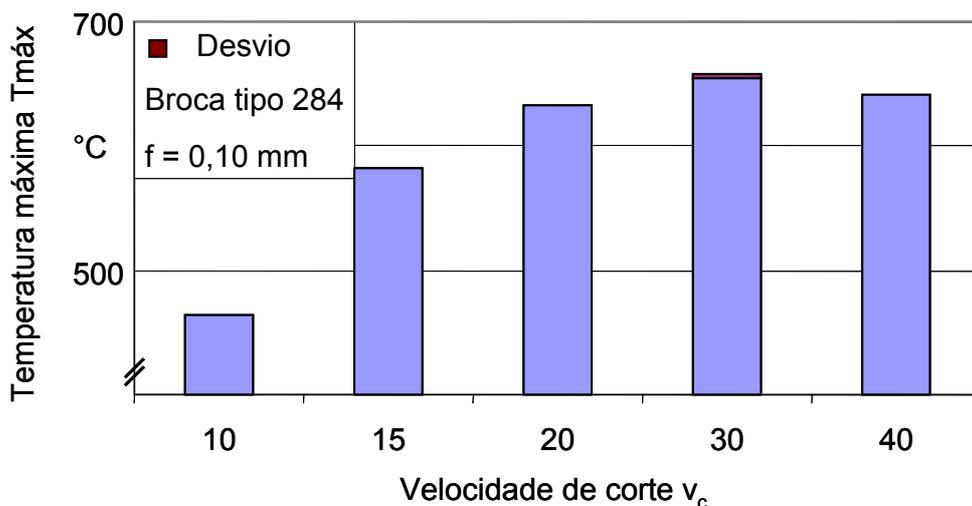


Figura 5. 84 – Máxima temperatura na broca para a ferramenta do tipo 284 com 2 gumes, como função da velocidade de corte

EISENBLÄTTER [46] determinou a temperatura na furação a seco das ligas Ck45K e 9SMn28 com o método da broca fixa e a peça em rotação, figura 5.85. Para EISENBLÄTTER, o aumento da velocidade de corte causou um aumento significativo nas temperaturas medidas no gume, o que já não aconteceu com o aumento do avanço. Na comparação entre aplicação de emulsão, de MQF e a seco, foram obti-

das menores temperaturas para a furação com emulsão e maiores para a furação a seco.

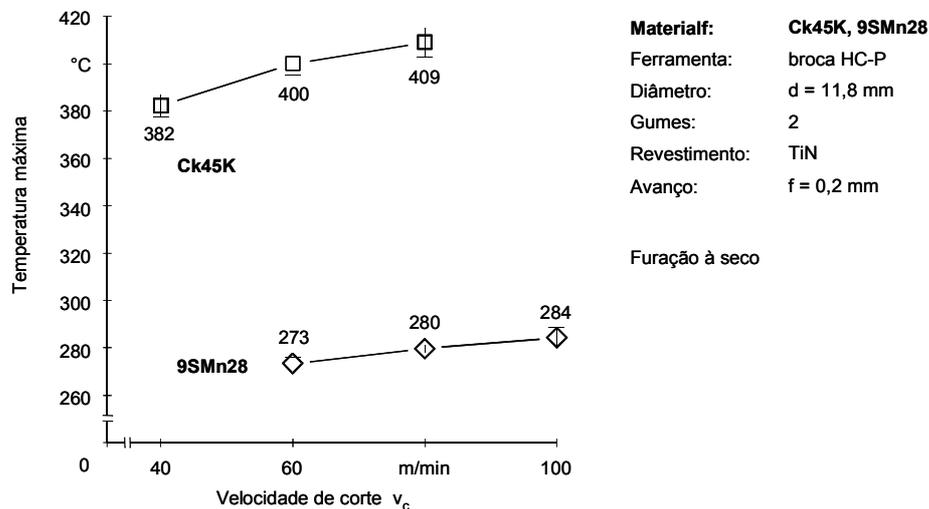


Figura 5. 85 – Temperatura na furação a seco dos aços Ck45K e 9SMn28, com a broca fixa [46]

Verifica-se que a temperatura na furação a seco do aço Ck45k é de aproximadamente 380°C para uma velocidade de corte de 40 m/min [46], enquanto que para esta mesma condição a temperatura na usinagem da liga Ti6Al4V varia de 700 a 770°C.

DROESE [111] pesquisou a influência do revestimento de nitreto de titânio, TiN, depositado sobre brocas de HSS. Na medição de temperatura com estas brocas, DROESE instalou termo-elementos nos canais internos de refrigeração da broca, nas proximidades do flanco (3 mm de afastamento). Os resultados mostraram que o revestimento de TiN sobre o substrato de HSS reduziu os valores de temperatura. Para incrementos de velocidade de corte de 10 para 25 m/min, apresentou-se um acréscimo da temperatura na ordem de 20%. Nas brocas não-revestidas, este aumento foi de 60%.

5.3.2. Determinação da temperatura na peça

Para verificar a temperatura na peça para diferentes profundidades foi realizada a confecção de corpos de prova com orifícios para a inserção de termo-elementos do tipo K, conforme mostrado na figura 5.86.

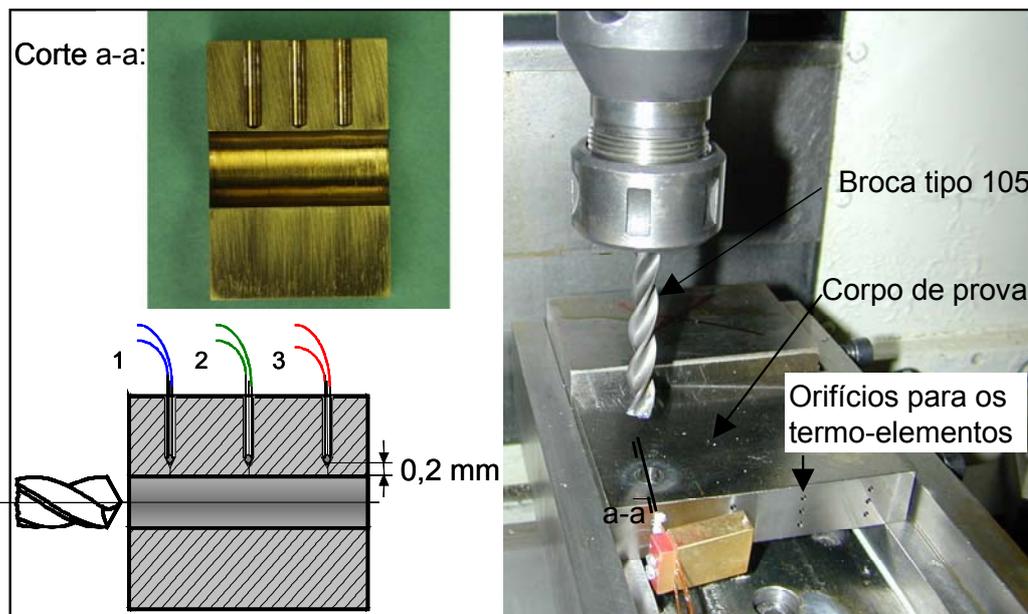


Figura 5. 86 – Representação esquemática e corte de um corpo de prova para a medição da temperatura na peça e o posicionamento da broca para a medição

O posicionamento de 3 termo-elementos (T1, T2 e T3) é feito numa distância de 0,2 mm da posição da parede do furo a ser executado, baseado na experiência de ensaios anteriormente efetuados no WZL.

Os termo-elementos foram posicionados equidistantes entre si, e 5 mm afastados das duas bordas, permitindo a medição das temperaturas para as profundidades de 5, 10 e 15 mm, nos termo-elementos 1, 2 e 3. Dessa forma, pode ser registrada a evolução dos gradientes de temperatura ao longo do eixo do furo durante a furação. A correta fixação dos sensores no fundo dos furos realizados nos corpos de prova é garantida por um dispositivo especificamente projetado.

O emprego de uma termo-pasta nos orifícios, juntamente com o termo-elemento, garante a condução uniforme do calor da peça para o termo-elemento.

Todas as medições foram realizadas com uma mesma metodologia adotada para a medição da temperatura no gume da broca. As informações referentes a calibração do sistema de medição de temperatura na peça estão no anexo II, item 9.2.

Algumas medições foram afetadas por problemas relacionados com o correto posicionamento da ponta dos sensores. Como não foi possível a visualização dos sensores no fundo do orifício do corpo de prova, figura 5.86, e nem se tinha a garantia de que o orifício estava completamente preenchido com a termo-pasta, algumas diferenças do comportamento da evolução da temperatura foram registradas. O problema poderia ainda estar relacionado com a fabricação dos furos na lateral dos corpos de prova. Os furos das peças para a inserção dos sensores possuíam um diâmetro de 2 mm e uma profundidade de 10 mm, e deveriam estar perfeitamente ortogonais ao cilindro do furo a ser usinado. Este conjunto poderia apresentar uma pequena diferença que afetaria diretamente a distância dos termo-elementos em relação ao furo a ser executado pela broca e, conseqüentemente, a temperatura registrada. Estes fatores podem ter influenciado nas irregularidades e dispersões dos resultados obtidos, principalmente no comportamento previsto para os três termo-elementos que atuaram juntos na medição. O comportamento previsto para os três termo-elementos seria uma evolução do aumento da temperatura ao longo da profundidade de furação, onde as maiores temperaturas máximas seriam registradas no final do furo, isto é, $T1 < T2 < T3$.

Entretanto, mesmo com alguns resultados apresentando uma certa anomalia no comportamento da evolução da temperatura, estes apresentaram uma caracterização muito boa da temperatura para os diferentes processos. O problema apresentado nestes ensaios, acima citado, também foi percebido por EISENBLÄTTER [46] e por GERSCHWILER [47]. Um dos fatores apontados pelos pesquisadores foi a obstrução dos canais de escoamento de cavaco, que levou a um aumento da temperatura máxima registrada nos termo-elementos posicionados no meio e na entrada do furo, onde não deveriam ser medidos os maiores valores de temperatura.

A figura 5.87 apresenta os resultados das temperaturas máximas registradas na peça para diferentes condições de aplicação de fluido lubri-refrigerante, como função da velocidade de corte.

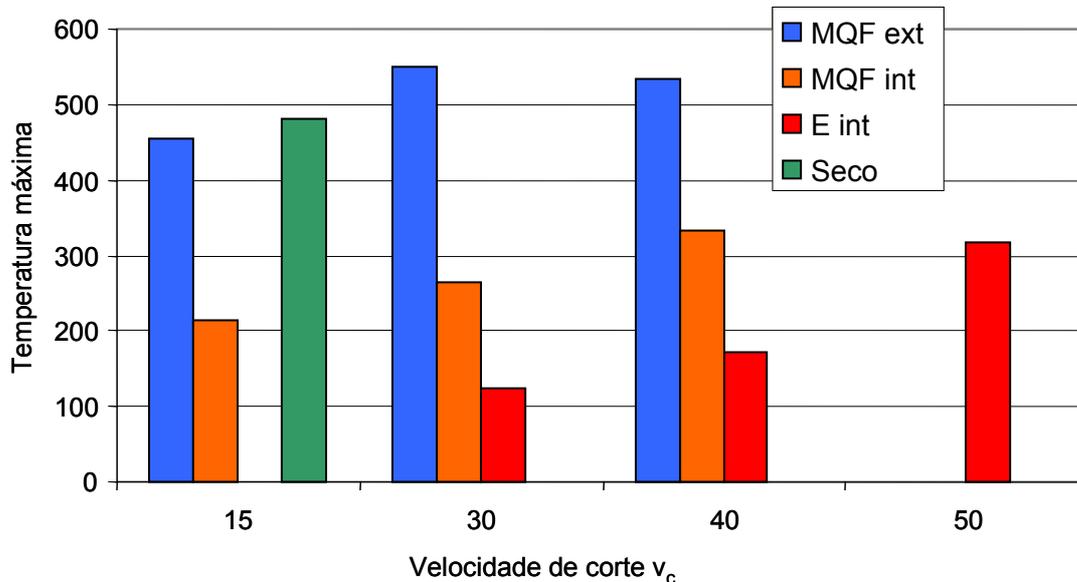


Figura 5. 87 – Temperatura máxima na peça para diferentes condições de aplicação de fluido lubri-refrigerante

Verifica-se o efeito de refrigeração da emulsão abundante aplicada pelo interior da ferramenta. As temperaturas máximas registradas na furação com emulsão abundante pelo interior da ferramenta ficaram na faixa de 22 a 32% dos valores obtidos com a aplicação de MQF por bicos externos. Na comparação de MQF aplicado por bicos externos ou pelo interior da ferramenta, os valores desta segunda condição apresentaram uma redução de aproximadamente 50%. Entre a furação com MQF aplicado com bicos externos e a seco, os valores desta segunda condição foram aproximadamente 6% superiores, de 455°C para 482°C, não sendo registrado valores confiáveis para velocidades de corte acima de 15 m/min, devido a problemas de super-aquecimento e evaporação da termo-pasta utilizada nos orifícios de refrigeração.

As elevadas temperaturas registradas nestes ensaios reforçam as explicações apresentadas e discutidas na análise sobre a integridade da superfície dos furos e sobre

o caldeamento de material nas paredes do furo e os efeitos térmicos influentes na forma destes. Para a furação a seco e com MQF aplicado por bicos externos, as temperaturas registradas são superiores a 450°C, para a velocidade de corte de 15 m/min, e ultrapassando os 500°C para velocidade de corte igual a 30 m/min. Para temperaturas superiores a 500°C, figura 5.26, a resistência mecânica da liga de titânio Ti6Al4V diminui sensivelmente e o material apresenta uma maior facilidade a ser deformado plasticamente, propícia ao escoamento entre a guia e a parede do furo, resultando na formação de caldeamentos sobre a superfície do furo.

As curvas de comportamento da temperatura medida na peça para os três termoelementos, na furação com emulsão abundante aplicada pelo interior da ferramenta, estão mostradas na figura 5.88.

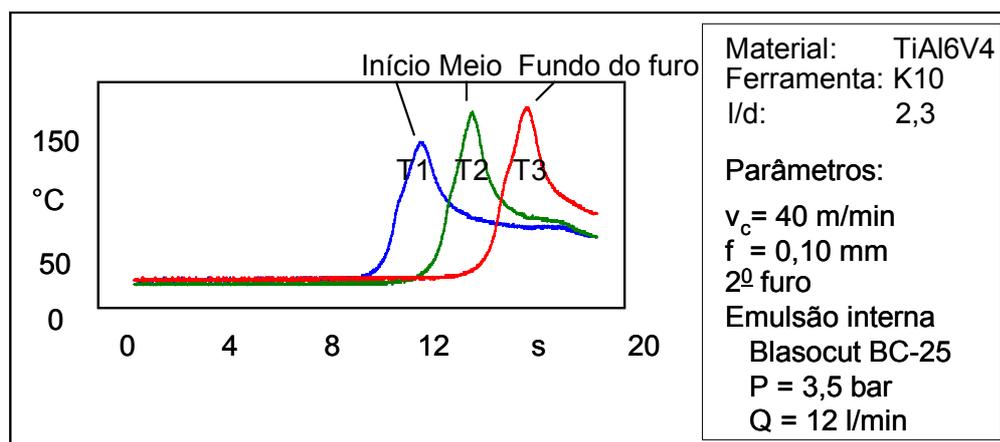


Figura 5. 88 – Comportamento da evolução da temperatura obtida na peça, na furação com emulsão abundante aplicada pelo interior da ferramenta

As curvas de temperatura para a condição de aplicação de emulsão aplicada internamente apresentaram comportamentos regulares e estáveis. Os picos de temperatura mostram o aumento gradativo da temperatura para maiores profundidades, sendo seguida a regra esperada das maiores temperaturas para maiores profundidades ($T1 < T2 < T3$). Para estes ensaios não houveram perturbações referentes ao mau posicionamento dos termo-elementos ou ao efeito perturbador da obstrução dos canais pelos cavacos observado na furação a seco e com MQF.

A máxima temperatura medida na peça situa-se ligeiramente acima dos 150°C. Com o posterior corte do furo e a análise visual da superfície gerada, confirmou-se a inexistência de uma influência térmica ou de partículas caldeadas de materiais estranhos sobre a superfície da parede do furo.

Para os ensaios com MQF aplicado por bicos externos foram obtidos os maiores valores de temperaturas, pois para a furação a seco não foram registrados dados confiáveis para elevadas velocidades de corte. Para esta condição, foram testadas ferramentas com diferentes revestimentos sobre o substrato recomendado da classe K10. Os ensaios também foram realizados com ferramentas não-revestidas, possibilitando assim uma comparação do efeito do comportamento do revestimento sobre a máxima temperatura registrada.

A figura 5.89 mostra os resultados obtidos na furação com aplicação de MQF por bicos externos, sem e com diferentes revestimentos, como função da velocidade de corte.

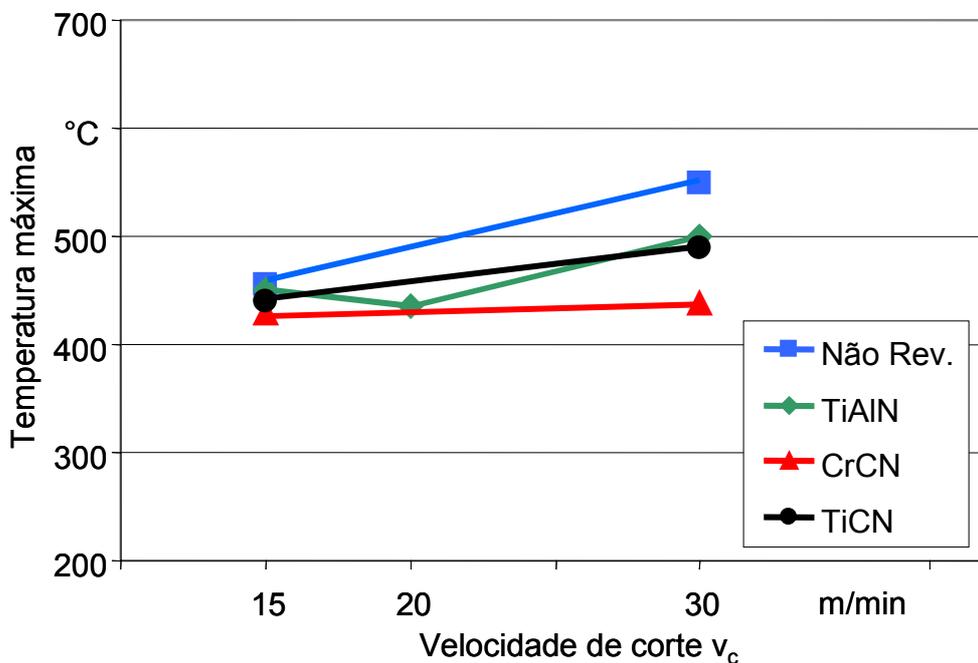


Figura 5. 89 – Máxima temperatura registrada na peça para ferramenta sem e com diferentes revestimentos, como função da velocidade de corte

Os resultados mostram uma tendência clara de maiores temperaturas para as ferramentas não revestidas. Esta diferença é mais evidenciada para a velocidade de corte de 30 m/min.

Em todas as curvas de comportamento da evolução da temperatura máxima medida na peça, como função da velocidade de corte, evidenciou-se o incremento dos valores de temperatura. Com o aumento da velocidade de corte este comportamento era esperado, pois com o aumento da velocidade de corte a geração de calor se dá em um menor intervalo de tempo, e devido à baixa condutividade térmica da liga de titânio Ti6Al4V, leva a uma maior temperatura. Este comportamento é melhor detalhado na literatura técnica, tanto para a usinagem convencional [2, 4] como para a usinagem ecológica já existente [7, 37, 46].

O comportamento das temperaturas máximas para a velocidade de corte de 30 m/min, para os três termo-elementos empregados no ensaio, é mostrado na figura 5.90. Pode ser verificado um efeito positivo dos revestimentos, que reduzem a temperatura na peça.

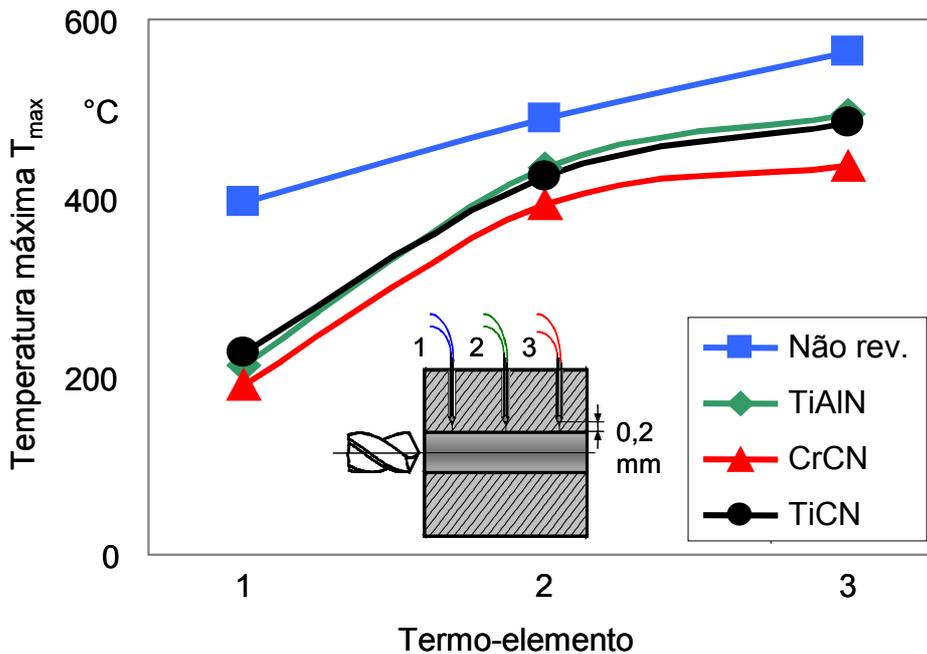


Figura 5. 90 – Temperatura máxima na peça para os 3 termo-elementos em diferentes profundidades, para uma velocidade de corte de 30 m/min e MQF aplicado por bicos externos

As maiores temperaturas na peça foram alcançadas para a ferramenta não-revestida. A temperatura medida pelo termo-elemento 1 (T1) mostra que nesta posição (5 mm de profundidade), a ferramenta não-revestida propicia praticamente o dobro do valor em relação às ferramentas revestidas. A medição da temperatura para as profundidades de 10 e 15 mm apresenta uma redução da diferença entre a ferramenta não-revestida e as revestidas. No entanto, obtém-se ainda uma diferença significativa da temperatura.

Através de uma análise do comportamento da temperatura medida para diferentes revestimentos utilizados sobre o substrato, como não há uma significativa diferença dos resultados, não é possível a determinação do revestimento que apresenta um melhor comportamento. No entanto, existe uma ligeira tendência de menores valores T registrados para o revestimento CrCN. Para os outros revestimentos, TiAlN e TiCN, os resultados diferem em poucos graus centígrados.

Na avaliação do comportamento das curvas de temperatura ao longo do tempo, todas as ferramentas revestidas apresentaram características semelhantes.

A figura 5.91 mostra o comportamento da evolução da temperatura para os 3 termo-elementos, para a broca revestida com o filme de TiAlN. Este revestimento é amplamente recomendado pela literatura e pelos fabricantes de ferramenta, para trabalhos a elevadas temperaturas de usinagem e para usinagem a seco [46, 47, 62, 115 – 118].

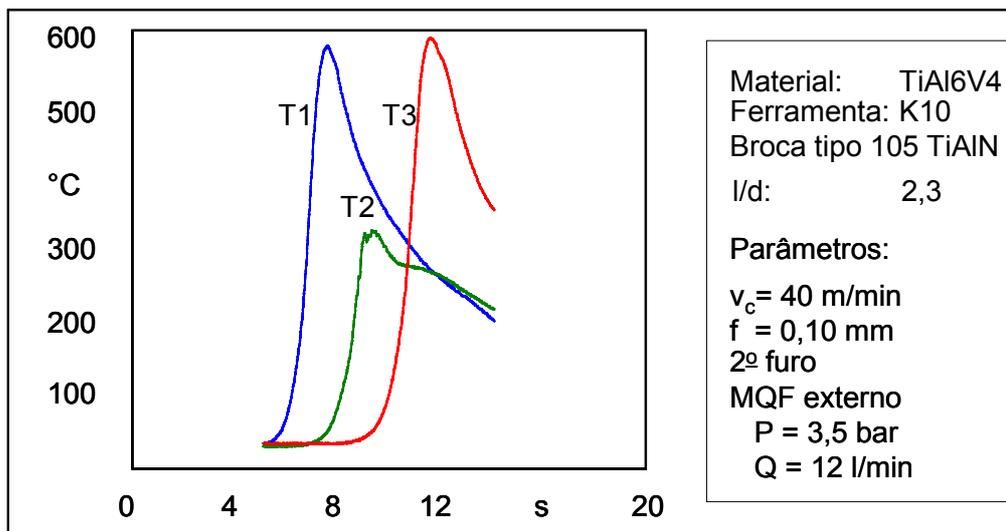


Figura 5. 91 – Comportamento da evolução da temperatura na peça e dos esforços de usinagem para a broca revestida com TiAlN

O gráfico mostra uma discrepância para o termo-elemento 2 (T2) na medição. Este termo-elemento deveria apresentar uma temperatura situada entre os termo-elementos 1 e 3, mas o comportamento não esperado aponta algum problema, possivelmente o posicionamento incorreto do termo-elemento no fundo do orifício ou do preenchimento do furo com a termo-pasta.

O comportamento da temperatura medida na peça, na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta está apresentado na figura 5.92. Verifica-se a tendência dos menores valores obtidos para este processo, em relação aos obtidos com o MQF aplicado por bicos externos. Os valores são aproximadamente 50% menores.

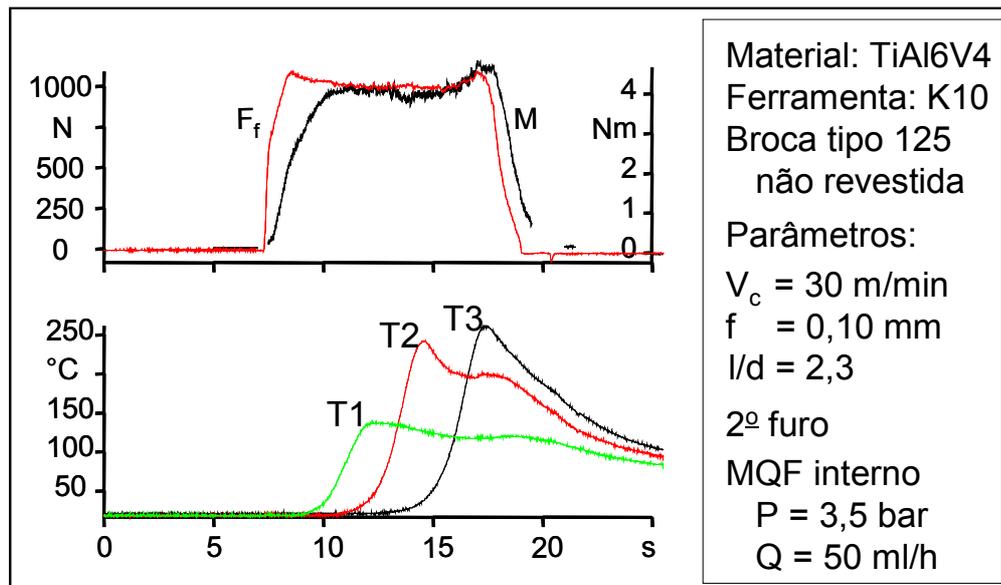


Figura 5. 92 – Comportamento da temperatura medida na peça, na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta

A figura também mostra o comportamento da força de avanço e do momento torçor como função do tempo de corte. O comportamento típico destas duas grandezas espelha basicamente o comportamento do material em relação ao aumento da temperatura e a maior área de contato entre a ferramenta e a parede do furo, e um aumento do contato do cavaco com a parede no final do furo, propiciando um aumento no momento torçor.

Como descrito no capítulo de esforços mecânicos sobre a ferramenta, as temperaturas afetam o comportamento do material. Isto é, com o aumento da temperatura, tem-se uma tendência a haver uma diminuição dos esforços de penetração, principalmente na força de avanço F_f . Isto também pôde ser evidenciado em casos onde as temperaturas medidas não são tão elevadas, como no caso de aplicação de MQF pelo interior da ferramenta.

A figura 5.93 mostra uma relação entre a máxima temperatura medida na peça, a força de avanço e o momento torçor, para a condição de MQF aplicado pelo interior da ferramenta.

Com o aumento da velocidade de corte, há uma redução da força de avanço, e o momento torçor apresenta também uma pequena tendência a redução. Para as velocidades de corte de 30 e 40 m/min, os valores não apresentaram mais uma diferença clara.

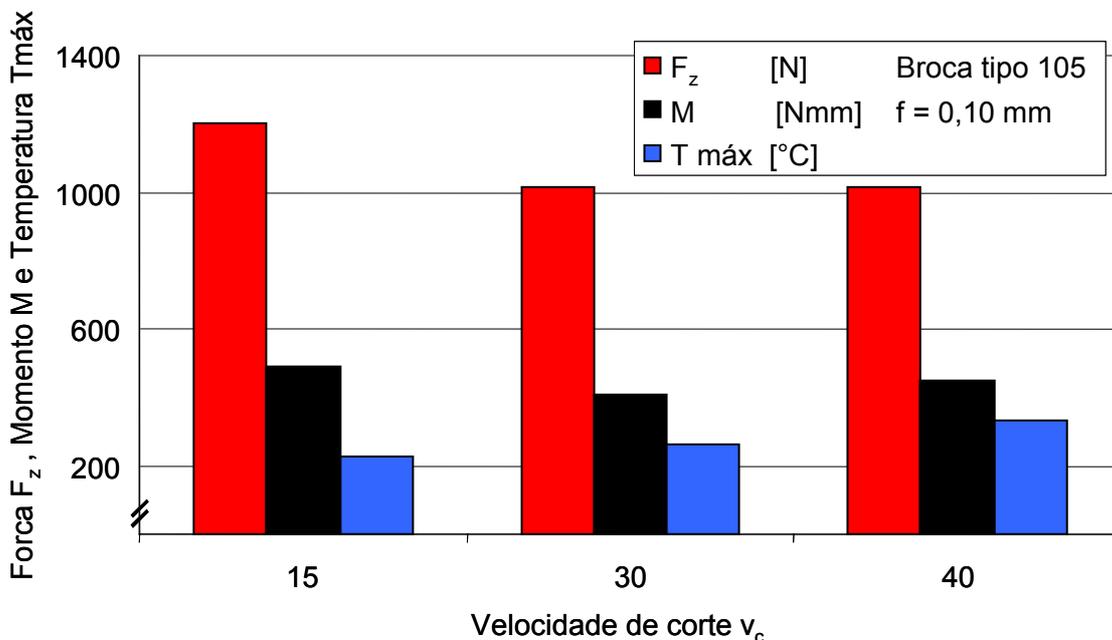


Figura 5. 93 – Relação entre máxima temperatura e os esforços mecânicos, para a aplicação de MQF pelo interior da ferramenta

Verifica-se a relação entre a temperatura e a força de avanço para o aumento da velocidade de corte. Para a velocidade de corte de 15 m/min tem-se uma menor temperatura e conseqüentemente uma maior força de avanço. Para as velocidades de corte de 30 e 40 m/min não verificou-se mais esta tendência. A figura 5.94 mostra o comportamento da temperatura na peça na furação a seco.

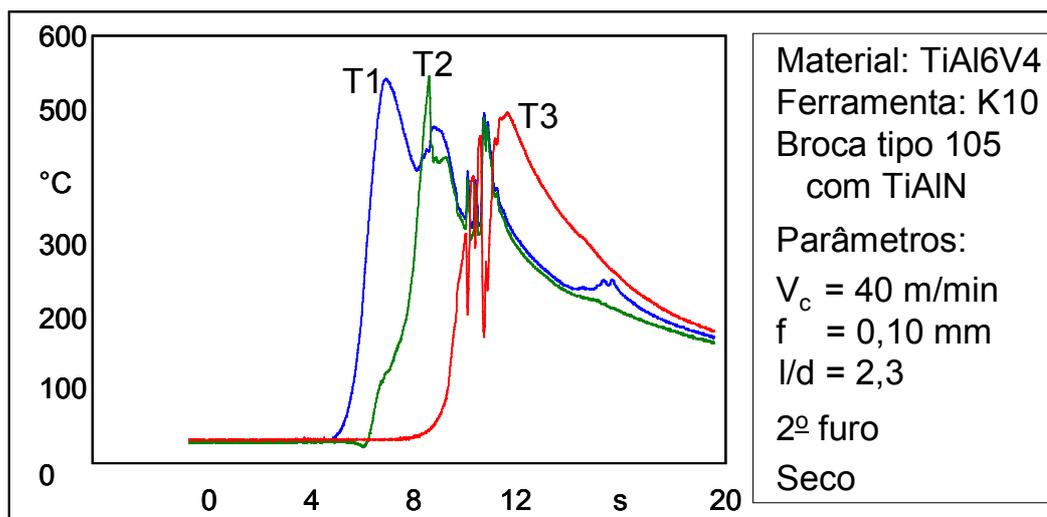


Figura 5. 94 – Comportamento da temperatura na peça para a furação a seco

No comportamento da temperatura para a furação a seco, verifica-se a não-regularidade do comportamento da temperatura ao longo da evolução do furo. Isto pode ser explicado pelo excesso de cavaco emaranhado em torno da ferramenta. O cavaco longo, do tipo segmentado, ao ser gerado na região de corte, acumulou-se nas câmaras de escoamento de cavaco e ocasionou a obstrução dos mesmos. Isto pode ser entendido, observando-se o comportamento das curvas de temperatura dos 3 termo-elementos. Até o pico de temperatura do T1, praticamente não houveram problemas, pois para esta profundidade de corte o cavaco não apresentou problemas no transporte para fora do furo. Após o pico do termo-elemento T1, juntamente com o pico do termo-elemento T2, há um segundo pico do termo-elemento T1. Este pico secundário espelha um novo contato na parede do furo na proximidade do posicionamento do termo-elemento T1. Como a ferramenta já está próxima à posição do termo-elemento T2, conclui-se que este contato foi realizado pelo esmagamento de um cavaco. A partir desta profundidade a situação permanece instável e há uma irregularidade do comportamento de medição.

Resumidamente, as temperaturas medidas, tanto no gume como na peça usinada, atingiram valores máximos de até 700°C. Se for considerada uma temperatura localizada média de 500°C na peça e na ferramenta, poderia ser estimada a dilatação linear da ponta da ferramenta e da estricção da peça, comprovando o modelo descrito para geração da forma de sino do furo. Para um coeficiente de dilatação térmica

ca do metal-duro classe K10 de $5 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ e do titânio puro de $8,2 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ [124]. Para uma broca de 10 mm de diâmetro tem-se um aumento de diâmetro de $25 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ ($5 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 500$). Considerando a camada aquecida na peça com uma espessura de 1 mm (linha neutra a 1 mm de profundidade) a diminuição de diâmetro é de $8,2 \text{ } \mu\text{m}$ ($2 \cdot 1 \cdot 8,2 \cdot 10^{-6} \cdot 500$). O final do furo deve apresentar um acréscimo de aproximadamente $33 \text{ } \mu\text{m}$ ($8,2 \text{ } \mu\text{m}$ da peça e $25 \text{ } \mu\text{m}$ da broca).

Na superfície da parede do furo não foram registradas marcas da saída da broca. Como a máxima temperatura do gume ocorre no momento de saída do furo, verifica-se na curva de comportamento da temperatura na ferramenta, figura 5.78, que logo após a saída do furo há uma grande redução da temperatura da broca, que retorna a sua dimensão inicial. Como o furo, após uma contração inicial, dilata, a broca não risca a superfície ao retornar para fora do furo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

6.1 Conclusões

A furação da liga de titânio Ti6Al4V com mínimas quantidades de fluido de corte é possível. Aplicando-se o fluido através de atomizadores externos a furação fica limitada à profundidade de uma vez o diâmetro da broca. Para a alimentação do MQF através da broca obtiveram-se resultados tão bons quanto os obtidos por fluido de corte aplicado com abundância através da ferramenta.

A escolha por um processo de utilização de MQF depende dos requisitos como a qualidade dimensional, a qualidade da integridade dos furos e a vida da ferramenta de corte.

A respeito das grandezas mecânicas sobre a ferramenta, pôde-se concluir que:

- na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta podem ser obtidas vidas de ferramenta satisfatórias, entretanto, tem-se uma perda da segurança do processo, pois para os ensaios realizados foram obtidas grandes dispersões de resultados;
- a aplicação de emulsão aplicada por bicos externos apresentou resultados inferiores aos obtidos com MQF;
- na furação com MQF aplicado por bicos externos, encontrou-se grande dificuldade na medição de desgaste, devido às elevadas taxas de adesão de material sobre o gume da ferramenta;
- os revestimentos não apresentaram diferenças significativas para a vida das ferramentas de corte, quando da usinagem com MQF aplicado por bicos externos;

- brocas com cabeças intercambiáveis não apresentaram resultados satisfatórios, mesmo sob utilização de emulsão em abundância aplicada por bicos externos, devido principalmente ao fato destas ferramentas possuírem guias mais largas;
- furação com avanço intermitente não apresentou ganhos em relação à vida da ferramenta;
- a maior parcela da força de avanço F_f é de responsabilidade da região central da broca, atingindo valores entre 50 e 60% da força total de avanço. Na região do gume principal, as maiores parcelas foram a força de corte, seguida pela força de avanço e passiva;
- o atrito das guias da broca com a parede do furo possui influência somente sobre o momento torçor, sendo desprezível sobre as forças de avanço; e
- os tipos dos cavacos obtidos com MQF aplicado pelo interior da ferramenta são satisfatórios, o que não aconteceu para a condição de MQF aplicado por bicos externos e na furação a seco.

A respeito das grandezas mecânicas sobre a peça, pôde-se concluir que:

- a rugosidade obtida para a aplicação de MQF pelo interior da ferramenta é semelhante à obtida com aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta, para as condições usuais de indústria;
- a qualidade superficial dos furos deteriora-se ao longo do número de furos, particularmente para a aplicação de MQF por bicos externos, onde existe uma maior solicitação térmica e taxas mais elevadas de aderência de material sobre o gume cortante;
- as deformações plásticas apresentadas nos furos sob aplicação de MQF pelo interior da ferramenta são satisfatórias, sendo semelhantes às obtidas com aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta;

- as deformações plásticas na furação com aplicação de MQF por bicos externos não são adequadas para a fabricação de componentes de risco, como as peças para turbinas aeronáuticas, pois não se pôde ter uma segurança das superfícies adquiridas devido às dificuldades de análise das mesmas. Ao longo de toda a superfície foram verificados caldeamentos de materiais oriundos do cavaco arrastado entre as guias da broca e a parede do furo;
- os diâmetros nominais obtidos na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta apresentaram-se ligeiramente superiores ao diâmetro nominal teórico pré-estabelecido (8,5 mm H8). Entretanto, esta diferença do diâmetro pode ser corrigida por processos posteriores ao da furação, ou com correções da ferramenta de corte;
- os diâmetros nominais obtidos na furação com MQF aplicado por bicos externos apresentaram-se muito superiores ao pré-estabelecido, devido principalmente ao fato da geração de elevadas temperaturas no processo sob esta condição;
- a circularidade obtida na furação com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta é, de uma maneira geral, satisfatória, apresentando-se para quase todos os ensaios, dentro da tolerância H8 exigida;
- a circularidade obtida na furação com aplicação de MQF por bicos externos é de uma maneira geral insatisfatória, devido ao problema de materiais caldeados na parede do furo; e
- a circularidade obtida no alargamento sob condição de aplicação de MQF pelo interior da ferramenta foi satisfatória para a totalidade dos ensaios realizados, apresentando-se dentro da classe de tolerância H7 exigida.

A respeito das grandezas térmicas sobre a ferramenta, pôde-se concluir que:

- as temperaturas medidas para a condição de aplicação de MQF por bicos externos são elevadas e prejudicam a qualidade dos furos obtidos,

- com o aumento da velocidade de corte, verificou-se para quase todos os ensaios um aumento das temperaturas; e
- para a condição de aplicação de MQF por bicos externos, houve uma ligeira redução das temperaturas medidas no gume da broca, em relação ao corte a seco.

A respeito das grandezas térmicas sobre a peça, pôde-se concluir que:

- as temperaturas medidas com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta apresentaram-se cerca de 50% menores que as obtidas com MQF aplicado por bicos externos;
- com MQF aplicado com bicos externos, maiores temperaturas apresentaram-se na peça, empregando-se brocas não-revestidas;
- para a aplicação de MQF com bicos externos, os diferentes revestimentos (TiAlN, TiCN e CrCN) propiciaram valores semelhantes de temperatura na peça; e
- com o aumento da temperatura, menores forças de avanço foram medidas, caracterizadas pela menor resistência do material em relação à penetração da ponta da ferramenta de corte (F_f). Esta tendência não ocorreu para os valores medidos do momento torçor M .

6.2 Sugestões para Novos Trabalhos

Como linhas de pesquisa que podem ser complementares a este trabalho, são sugeridos os seguintes tópicos:

- um estudo das emissões de óleo e meio gasoso gerados na aplicação de MQF, gerando-se assim um maior conhecimento do sistema e suas conseqüências sobre o meio ambiente;

- um estudo envolvendo diferentes meios lubrificantes para a furação de Ti6Al4V com aplicação de MQF;
- avaliar de forma mais detalhada o comportamento da temperatura para velocidades de corte maiores;
- um estudo das tensões residuais resultantes na superfície dos furos para o processo de furação, alargamento e fresamento, sob aplicação de MQF; e
- um estudo de MQF aplicado a elevadas pressões de trabalho, facilitando assim a quebra de cavaco e a efetividade da lubrificação e refrigeração em regiões mais próximas as zonas de contato ferramenta / peça / cavaco. Neste tema existem trabalhos referentes a aplicação de elevadas pressões de fluido lubri-refrigerante, com emulsão aplicada na usinagem de ligas de titânio [123, 125].

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EISENBLAETTER, G. Palestra da Defesa de Doutorado. WZL RWTH Aachen, 1999.
- [2] STEMMER, G. E. **Ferramentas de corte I**. Ed. da UFSC. Florianópolis, 3. Ed. 1993.
- [3] FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1970. 751p.
- [4] KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 5. Auflage 1997, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- [5] TÖNSHOFF, H.K.; MOHLFELD, A. **PVD-Coatings for wear protection in dry cutting operations**. Surface and Coatings Technology, Vol. 93, Issue: 1, August, 1997, pp. 88-92.
- [6] KÖNIG, W. et al. **Trockenzerspanen - Eine ökologische Herausforderung an die Fertigungstechnik**. In: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik - Aachener Perspektiven. Hrsg.: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993, Seite 5/1 - 5/48
- [7] KLOCKE, F.; GERSCHWILER, K. **Trockenbearbeitung - Grundlagen, Grenzen, Perspektiven**. In: VDI-Bericht 1375 Trockenbearbeitung prismatischer Teile. Tagung Aachen, 30./31.03.1998. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998, Seite 13 – 51.

- [8] WEINERT, K. **Zukunftsperspektiven in der Spanenden Fertigung.** www-isf.maschinenbau.uni-dortmund.de/tagung97/tagung/weiner.htm.
- [9] SREEJITH, P.S.; NGOI, B.K.A. **Dry machining: Machining of the future.** Journal of Materials Processing Technology, Vol. 101, Issue: 1-3, April 14, 2000, pp. D98287-291.
- [10] SAHM, D. et al. **Geht es auch ohne?** Werkstatt und Betrieb, 128, 1995. Seiten 17-18.
- [11] THAMKE, D. **Möglilchkeiten und Grenzen der Trockenbearbeitung.** Internet: www-isf.maschinenbau.uni-dortmund.de. 2000.
- [12] ANDREA. P. **Ökologie und Fertigungsprozesse.** Internet: www.ifw.uni-hannover.de. 2000.
- [13] SIBUM, H. **Reintitan: Herstellung und Anwendung.** Palestra 1, Deutsche Titan GmbH. DGM-Workshop Titan, München, 30-31.03.2000.
- [14] HELM, D. **Titan in der Luftfahrt – Anwendungen im Triebwerksbau.** Palestra 3, DaimlerChrysler Aerospace / MTU. DGM-Workshop Titan, München, 30-31.03.2000.
- [15] SCHAUERTE, O. **Anforderungen an den Werkstoff Titan im Fahrzeugbau.** Palestra 4, Volkswagen AG. DGM-Workshop Titan, München, 30-31.03.2000.
- [16] YAMADA, M. **An overview on the development of Titanium alloys for non-aerospace application in Japan.** MSE, vol. A213, 1996, pp. 8-15.
- [17] BOYER, R. R.. **An overview on the use of Titanium in the aerospace industry.** Materials Science and Engineering, vol. A213, 1996, pp. 103-114

- [18] SCHUTZ, R. W.; WATKINS, H. B. **Recent developments in titanium alloy application in the energy industry**. Materials Science and Engineering, 1998, 305-315.
- [19] OHKUBO, C.; WATANABE, I.; FORD, J.P.; NAKAJIMA, H.; HOSOI, T.; OKABE, T. **The machinability of cast titanium and Ti-6Al-4V**. Biomaterials, Vol. 21, Issue: 4, February, 2000, pp. 421-428.
- [20] EZUGWU, E. D.; WANG, Z. M. **Titanium alloys and their machinability - a review**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 68, 1997, pp. 262-274.
- [21] WATANABE, I. et al. **Cutting efficiency of air-turbine burs on cast titanium and dental casting alloys**. Dental Materials, Vol. 16, Issue: 6, November, 2000, pp. 420-425.
- [22] IVASISHIN, O. M.; TELIOVICH, R. V. **Potential of rapid heat treatment of titanium alloys and steels**. Materials Science and Engineering, 1999, 142-154.
- [23] BROADWELL, R. G. **Recent Developments in Titanium Alloys**. Metals Engineering Quarterly, August 1963, 26-32.
- [24] FINLAY, W. L.; VORDAHL, M. B. **The Titanium Alloys Today**. Metal Progress, February 1952, 73-78.
- [25] FINLAY, W. L. et al. **The ABC of Titanium Alloys**. Metal Progress, November 1952, 73-78.
- [26] GERSCHWILER, K. **Hochleistungswerkstoffe im Turbinenbau Eine Herausforderung an die Werkstoffwissenschaften und an die Fertigungstechnik**. Aachen, Dezember 1997.

- [27] NN. **Der Werkstoff Titan**. Material apresentado em palestra no WZL.
- [28] LE MAITRE, F. **Contribution a l'étude de l'usinage du titane et de ses alliages**. CIRP, vol. 18, pp. 413-424.
- [29] KRAMER, B. M. et al. **Theoretical consideration of rare earth metal compounds as tool materials for titanium machining**. CIRP, vol. 42/1/1993, pp. 111-114.
- [30] JAWAID, A. **Tool wear characteristics in turning of titanium alloy Ti-6246**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 92-93, 1999, pp. 329-334.
- [31] ZOYA, Z. A.; KRISHNAMURTHY, R. **The performance of CBN tools in the machining of titanium alloys**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 100, 2000, pp. 80-86.
- [32] KLOCKE, F.; GERSCHWILER, K. **Zerspanen von Titan- und Nickelbasislegierungen – Schneidstoffe im Leistungsvergleich**. Proceedings of the 14th International Plansee Seminar. Plansee AG, Reutte, 1997, Vol 2: Cemented Carbides and Hard Materials, 27-43.
- [33] KREIS, W. **Verschleißursachen beim Drehen von Titanwerkstoffen**. Dissertation WZL-RWTH Aachen. 1973. 137 S.
- [34] KÖNIG, W. Proc. 47th Meeting of AGARD Structural and Materials Panel, Florence, September 1978.
- [35] KÖNIG, W.; BÖMCKE, A. **Verschleißmechanismen beim Zerspanen mit PKD**. IDR 2/90, 78-87.
- [36] BAYOUMI, A.E.; XIE, J.Q. **Some metallurgical aspects of chip formation in cutting Ti-6wt.%Al-4wt.%V alloy**. Materials Science and Enginee-

ring: A, Vol. 190, Issue: 1-2, January, 1995, pp. 173-180.

- [37] KLOCKE, F.; GERSCHWILER, K. **Grundlagen der Trockenbearbeitung**. Trockenbearbeitungseminar. WZL, 2001
- [38] Dados de consumo de óleo mineral para a Alemanha, Ano 1999, Bundesamt, 2000.
- [39] THAMKE, D., R. SCHIRSCH, W. ZIELASKO: **Wirtschaftlichkeit der Trockenbearbeitung**. In: VDI-Bericht 1375 Trockenbearbeitung prismatischer Teile. Tagung Aachen, 30./31.03.1998. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998, pp. 371 – 397.
- [40] HOFF, M. **Analyse und Optimierung des Bohrprozesses**. Dissertation RWTH Aachen, 1986.
- [41] GRAß, A. **Bohren faserverstärkter Duromere**. Dissertation RWTH Aachen, 1988.
- [42] RUZICZKA, G. **Zerspanungsvorgänge beim Fräsbohren**. Dissertation Institut für Werkzeugmaschinen, Universität Stuttgart, 1995.
- [43] GÜHRING. **Hartstoffbohrer: schon voll ausgereizt? die Ratioboherer und ihre praxisgerechte Anwendung**. Deutschland, 1997, 156 p.
- [44] STEMMER, E. G. **Ferramentas de corte II**. Ed. Da UFSC. Florianopolis, 2^a Ed. 1995.
- [45] KANAI, M et al. **Statistical characteristics of drill life for the standardized performance test**. Annals of CIRP, v 27, 1978, 61-66.
- [46] EISENBLÄTTER, G. **Trockenbohren mit Vollhartmetallwerkzeugen**. Dissertation RWTH Aachen, 1999.

- [47] NN. Conversa com especialista da área de usinagem a seco, K. Gerschwiler. 2002.
- [48] WEINGAERTNER, W. L. et al. **Nashua Relatório Interno LMP**. 1986.
- [49] RAMSAY, J. M. G.. **Furação Profunda no Alumínio de Aviação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, 1988.
- [50] MÜLLER, M. **Optimierung der Lagerparameter einer magnetgelagerten Hochfrequenzspindel**. Dissertation, 2000.
- [51] PINTO, F. W. **Desenvolvimento de um Sistema de Mínimas Quantidades de Fluido de Corte Integrado ao Controle de uma Fresadora CNC** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- [52] NN. Firma MTU. Conversa com especialista da área de usinagem de componentes para turbinas aeronáuticas. 2002.
- [53] Catalogo de Operação da Máquina Chiron. **Vertikales CNC-Fertigungszentrum FZ 15 S five axis**. Chiron-Werke GmbH & Co. KG.
- [54] Firma Chiron. Endereço de Internet: www.chiron.de
- [55] Catalogo Link System. **Minimalmengenschmiersysteme, für jede Anwendung eine Lösung!** 15 p.
- [56] NN. Norma **DIN 51385**. Schmierstoffe; Kühlschmierstoffe; Begriffe
- [57] KLOCKE, F.; GERSCHWILER, K. **Trockenbearbeitung – Grundlagen, Grenzen, Perspektiven**. VDI Berichte 1240. 1996. p. 1 - 43.
- [58] N.N. Steidle Lubrimat L50 / L60. **Positionierung der Düsen**. Fax recebido,

agosto de 2001. 2 p.

- [59] N.N. Link GmbH. **Partikelgrößenuntersuchung**. Carta recebida, setembro de 2001. 2 p.
- [60] BRINKSMEIER, E. **Minimalschmiertechnik und Trockenbearbeitung in der spanenden Fertigung**. IWT, Bremen. Schriftenreihe Praxis Fórum. p. 4 – 85.
- [61] MÜLLER, P. **Bohrer und Gewindeschneidwerkzeuge für die Trockenbearbeitung**. Günther & Co. GmbH & Co. Frankfurt. Schriftenreihe Praxis Fórum. p.182 – 196.
- [62] N.N. Conversa com especialista em Broca da Firma Kennametal Hertel, Dr.-Ing. T. Krieg. 2001.
- [63] DERFLINGER, V. et al. **New hard / lubricant coating for dry machining**. Surface and Coatings Technology 113, 1999, p. 286 – 292.
- [64] SCHULZ, H. Et al. **Lubricating Coatings in Dry Cutting Applications**. Production Engineering, Vol. VII/2, 2000, p. 57 – 60.
- [65] BASTECK, A. **Trocken reiben**. Werkstatt und Betrieb 127, 1994, 11, p. 868 – 871.
- [66] KALHÖFER, E. **Dry Machining – Technology and Requirements to the Machine Tool**. Proceedings of the International Seminar on Improving Machine Tool Performance (Vol. II). July 6-8, 1998. Spain. p 663 – 641.
- [67] MASON, F. **A basket of productive drilling tools**. Machine Shop Guide Web Archive, November 1999.
- [68] LAHRES, MICHAEL; DOERFEL, OLIVER; NEUMÜLLER, ORALF **Applicability of different hard coatings in dry machining an austenitic ste-**

- el. Surface and Coatings Technology, Vol. 120-121, November, 1999, pp. 687-691.
- [69] TÖNSHOFF, H.K.; KARPUSCHEWSKI, B.; MOHLFELD, A.; SEEGER. **Influence of stress distribution on adhesion strength of sputtered hard coatings.** Thin Solid Films, Vol. 332, Issue: 1-2, November 2, 1998, pp. 146-150
- [70] N.M RENEVIER, N. LOBIONDO, V.C FOX, D.G TEER, J. HAMPSHIRE. **Performance of MoS₂ / metal composite coatings used for dry machining and other industrial applications.** Surface and Coatings technology, vol. 123, 2000, pp. 84-91
- [71] REINECK, I.; SJÖSTRAND, M. E.; KARNER J.; PEDRAZZINI, M. **Diamond Coated Cutting Tools.** Int. J. Refractory Metals & Hard Materials, Vol. 14, 1996, pp. 187-193.
- [72] MÜLLER-HUMMEL, P.; LAHRES, M. **Quantitative measurement of temperatures on diamond-coated tools during machining.** Diamond and Related Materials, Vol. 4, Issue: 10, September, 1995, pp. 1216-1221.
- [73] MONAGHAN, J.; MACGINLEY, T. **Modelling the orthogonal machining process using coated carbide cutting tools.** Computational Materials Science, Vol. 16, 1999, pp. 275-284.
- [74] JINDAL, P. C.; SANTHANAM, A. T.; SCHLEINKOFER, U.; SHUSTER, A. F. **Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN coated cemented carbide tools in turning.** International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, Vol. 17, 1999, pp. 163-170.
- [75] CHATTERJEE S. **Machining and morphological evaluation of diamond coated tungsten carbide drills.** Journal of Materials Science, Vol. 35, 2000, pp. 5707-5717.

- [76] LE HUU, T.; ZAIDI, H.; PAULMIER, D. **Lubricating properties of diamond-like coating.** *Wear*, Vol. 181-183, 1995, pp. 766-770.
- [77] SO, H. **The mechanism of oxidational wear.** *Wear*, Vol. 184, 1995, pp. 161-167.
- [78] LIM, S. C.; LIM, C. Y. H.; LEE, K. S. **The effects of machining conditions on the flank wear of TiN-coated high speed steel tool inserts.** *Wear*, Vol. 181-183, 1995, pp. 901-912.
- [79] LIM, S. C.; LIM, C. Y. H.; LEE, K. S. **Wear of TiC-coated carbide tools in dry turning.** *Wear*, Vol. 225-229, 1999, pp. 354-367.
- [80] LE HUU, T.; SCHMITT, M.; PAULMIER, D.; MAMALIS, A. G.; GRABCHENKO, A. **Tribological properties of smooth diamond coatings for cutting tools.** *Wear*, Vol. 225-229, 1999, pp. 843-847.
- [81] KATO, K.; KOIDE, H.; UMEHARA, N. **Micro-wear properties of carbon nitride coatings.** *Wear*, Vol. 238, 2000, pp. 40-44.
- [82] WIKLUND, U.; GUNNARS, J.; HOGMARK, S. **Influence of residual stresses on fracture and delamination of thin hard coatings.** *Wear*, Vol. 232, 1999, pp. 262-269.
- [83] JIE GU; GARY BARBER; SIMON TUNG; REN-JYH GU. **Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts.** *Wear*, vol. 225-229, 1999, pp. 273-284.
- [84] ZEILMANN, R. P. **Comportamento de Ferramentas Revestidas com TiN pelo Processo de Deposição Física *Sputtering* no Torneamento.** Mestrado UFSC, 1997.

- [85] WEINERT, K. **Trockenbearbeitung. 4.3 Bohren.** VDI Verlag. p. 96 – 121.
- [86] BORK, C. A. S. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541.** Mestrado UFSC, 1995.
- [87] NN. **Stahlschlüssel Taschenbuch.** Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH. 17. Auflage, 1995, 193 S.
- [88] ABEL, Oliver. **Untersuchung zur Ermittlung der partialen Werkzeugbelastung beim Trockenbohren in Stahlwerkstoffe mit Hartmetallwerkzeugen.** Studienarbeit RWTH. 1996.
- [89] WITTE, L. **Spezifische Zerspankräfte beim Drehen und Bohren.** Dissertation RWTH Aachen. 1980.
- [90] KAMMERMEIER, D. **Charakterisierung von binären und ternären Hartstoffschichten anhand von Simulations- und Zerspanuntersuchungen.** Dissertation RWTH Aachen. 1992.
- [91] HEWSON, J. **Surface Roughness (Ra) Analysis in Dry Drilling of Ti-6Al-4V.** Research Reports. LMA – Laboratory for Manufacturing Automation. University of Califórnia, Berkeley. 1999.
- [92] Catalogo de Fresa da Firma Fraisa. **Fräswerkzeugen.** 2001.
- [93] WÜNSCH, H. **Leistungssteigerung beim Schruppfräsen der Titanlegierung Ti6Al4V.** Studiumarbeit RWTH Aachen. 1998.
- [94] BUDAK, E. **Improving productivity and part quality in milling of titanium based impellers by chatter suppression and force control.** CIRP, vol. 49/1/2000, pp. 31-36.
- [95] ASPINWALL, D. et al. **HSM takes off in the Aerospace sector.** www.delcam.com/info/articles/hsm_rollsroyce.htm.

- [96] N.N. **Hochgeschwindigkeitsbearbeitung.** 4. Darmstädter Fertigungstechnisches Symposium. 1.-2, März 1989, Technische Hochschule Darmstadt.
- [97] LÓPES DE LECALLE, L. N. et al. **Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys.** Journal of Materials Processing Technology, vol. 100, 2000, pp. 1-11.
- [98] HAAN, D. M. et al. **An experimental study of cutting fluid effects in drilling.** Journal of Materials Processing Technology. 71, 1997, p. 305 – 313.
- [99] BONO, M.; NI, J. **The effects of thermal distortions on the diameter and cylindricity of dry drilled holes.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 41, 2001, 2261 – 2270.
- [100] WATANABE, K. et al. **Thermal analyses of the drilling process.** Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering 11, 1997, 71 – 77.
- [101] AGAPIOUS, J. S. STEPHENSON, D. A. **Analytical and experimental studies of drill temperatures.** Journal of Engineering for Industry 116, 1994, 54 – 60.
- [102] TÖNSHOFF, H. K. et al. **Machining of holes.** Annals of CIRP, Vol. x/x/xxxx, p. 1 – 10.
- [103] LENZ, E. Et al. **Investigation in Drilling.** Annals of CIRP, Vol. 27/1/1987, 49 – 53.
- [104] KALDOR, S.; LENZ, E. **Investigation in Tool life of Twist Drills.** Annals of CIRP, Vol. 29/1/1980, 23 – 27.
- [105] KALDOR, S.; LENZ, E. **Drill Point Geometry and Optimization.** ASME, Winter Annual Meeting, 1981.
- [106] ROTENBERG, I.; BERG, A. **A method for Drilling Parameters Evaluati-**

- on, **Applied for drill point development**. Annals of CIRP, Vol. 36/1/1987, 21 – 25.
- [107] FAY, E. **Kalibrierung von Berührungsthermometern – Verfahren, Normale, Meßeinrichtungen**. VDI-Lehrgang BW36-11-16 Technische Temperaturmessung, Stuttgart, 1990.
- [108] BLANKE, W. **Realisierung der internationalen Temperaturskala von 1990 – Grundlagen der Temperaturmeßtechnik**. . VDI-Lehrgang BW36-11-16 Technische Temperaturmessung, Stuttgart, 1990.
- [109] KÖRTVÉLYESSY, L. **Thermoelement Praxis**. Vulkan Verlag Essen. 3. Ed. 1998.
- [110] KOPPKA, F. **Temperaturmessung im rotierenden Werkstück bei der Hochgeschwindigkeitzerspanung**. Studienarbeit RWTH Aachen, 2000.
- [111] DROESE, J. **Titannitrid-beschichtete HSS-Spiralbohrer, Leistungsfähigkeit und Verschleißmechanismen**. Dissertation RWTH Aachen. 1987.
- [112] SCHMIDT, A. O.; ROUBIK, J. R. **Distribution of Heat Generated in Drilling**. Transaction of ASME 71, 1949, 245 – 252.
- [113] PAPAJEWSKI, J. et al. **Reiben von Aluminiumguß mit reduziertem KSS-Einsatz**. In: VDI-Bericht 1375 Trockenbearbeitung prismatischer Teile. Aachen, 1998. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1998, p. 93 – 111.
- [114] Catálogo da Firma Thermocoax e conversa com pessoa especializada da empresa. 2001.
- [115] Catálogo da Firma Kennametal-Hertel. **Bohrwerkzeugen**. 2001. (www.kennametal-hertel.de)
- [116] Catalogo da Firma Sandvik Coromant. **Bohrer**. 2002. (www.sandvik.de)

- [117] Catalogo da Firma Iscar. **Bohrer**. 2002. (www.iscar.com)
- [118] Catalogo da Firma Gühring GmbH. **Bohrwerkzeugen**. 2002. (www.guehring.de)
- [119] FISCHER, H. **Beitrag zur Untersuchung des thermischen Verhaltens von Bohr- und Fräsmaschinen**. Dissertation TU Berlin. 1970.
- [120] PABROSO, B. I. **Ermittlung der Wärmeverteilung beim Bohren mit Hartmetallwerkzeugen mit Hilfe der Kalorimetrie**. Diplomarbeit RWTH Aachen. 1998.
- [121] KIM, J. **Preliminary Experiment of Drilling Burr Formation in Titanium Alloy**. Research Reports. LMA – Laboratory for Manufacturing Automation. University of California, Berkeley. 1999.
- [122] HEWSON, J. **Exit Burr Size and Shape in Backplate Assisted Drilling of Ti-6Al-4V**. Research Reports. LMA – Laboratory for Manufacturing Automation. University of California, Berkeley. 1999.
- [123] LÓPEZ, L. N. et al. **Using High Pressure Coolant in the Drilling and turning of Low Machinability Alloys**. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2000, 85 – 91.
- [124] NN. **Tabellenbuch Metal**. 39. Auflage, Verlag Europa-Lehrmitte, Haan-Gruiten, 1994.
- [125] MACHADO, A. R. **Machining of Ti6Al4V and Inconel 901 with a High Pressure Coolant System**. University of Warwick, Inglaterra, 1990.
- [126] SPINTIG, W. **Prozeßführung und Werkstoffbeeinflussung beim Bohren gehärteter Stähle**. Dissertation IFW Hannover. 1995.
- [127] WEINERT, K.; THANKE, D. **Kühlschmierkonzepte für die Bohrungsbearbeitung**. In: VDI-Bericht 1240 Auf dem Weg zur Trockenbearbeitung. Düsseldorf, VDI-Verlag 1996, 111 – 124.

- [128] KRONENBERG, M. **Theory and Practice for Operations and Development of Machining Processes**. Machining Science and Application. 1966.
- [129] VIEREGGE, G. **Zerspanung der Eisenwerkstoffe**. 2. Ed. Düsseldorf, 1970.

ANEXOS I

Máquinas e Equipamentos Empregados nos Experimentos

Uma das máquinas empregadas na realização dos ensaios, conforme a citação acima, é da Firma Chiron. Algumas características importantes desta máquina estão listadas a seguir.

Tipo de máquina:	Centro de Usinagem Vertical - CNC
Modelo:	FZ 15 S five axis
Campo de rotação:	20 – 20.000 rpm
Pressão de trabalho:	até 70 bar
Sistema de MQF para aplicação pelo fuso:	Chiron Micro-Mist, P = 0 – 10 bar, volume programável [53].

Esta máquina foi concebida dentro do conceito mais moderno de máquina-ferramenta para a usinagem a seco. A máquina foi projetada para não haver distorções dimensionais indesejáveis, causadas pelas variações térmicas inerentes ao processo. A máquina é dotada de um sistema de MQF para aplicação do fluido (meio aerosol) através do mancal e mandril da ferramenta, isto é, para MQF aplicado internamente.

Os parâmetros selecionados para a obtenção da quantidade de fluido necessário requerido nos ensaios ($V = 50$ ml/h e $P = 3,5$ bar) foram adotados com base nos manuais disponibilizados pelo fabricante do equipamento. Assim, não houve a preo-

cupação de averiguar as informações fornecidas pelo fabricante do sistema de MQF. Pois, para uma avaliação profunda das características da névoa de fluido gerada pelo sistema, seria necessário um vasto tempo de análise, e os objetivos estariam dessa forma sendo desviado dos inicialmente propostos.

A figura 8.1 mostra o Centro de Usinagem Vertical CNC da Chiron, concebido dentro de um moderno conceito para a usinagem a seco [54].



Figura 8. 1 – Centro de Usinagem Vertical Chiron FZ 15 S [54]

Para o desenvolvimento dos experimentos foram utilizadas várias outras máquinas e equipamentos que forneceram suporte técnico para o andamento das atividades programadas. Os principais equipamentos e máquinas utilizados estão listados a seguir:

- dois equipamentos para aplicação de MQF externo do tipo microjet, da Firma Link;
- uma serra-fita;
- duas máquinas de eletro-erosão à fio, para o corte dos furos;
- uma máquina de medição 3D, por coordenadas, da Zeiss;
- um rugosímetro Perthen;

- dois perfilômetros;
- acessórios e equipamentos de medição, como micrômetros e paquímetros;
- duas plataformas piezelétricas para medições de forças de usinagem e momento torçor, da Firma Kistler;
- amplificadores e filtros de sinais;
- um Microscópio Eletrônico de Varredura MEV;
- três Microscópios de Ferramentaria com aumentos de 8 até 100x;
- duas câmeras fotográficas digitais;
- uma câmera CCD;
- um durômetro;
- um microscópio dotado e um micro-durômetro, com câmera CCD e computador;
- acessórios e aparelhos para testes de metalografia, para corte, polimento, e embutimento de amostras;
- computadores e softwares necessários ao desenvolvimento do trabalho;
- os equipamentos da oficina de apoio e serviços elétricos do WZL, disponíveis para a fabricação, montagem e calibração de dispositivos e aparelhos elétrico / eletrônicos; e
- as máquinas e equipamentos da oficina de apoio e serviço do WZL, disponíveis para a fabricação de corpos de prova e dispositivos utilizados nos experimentos.

Um dos principais equipamentos empregados nos ensaios experimentais foi o equipamento para aplicação de MQF por bicos externos, da Firma Link, figura 8.2. Algumas características importantes deste equipamento [55] estão descritos a seguir.

Equipamento:	Sistema de MQF para aplicação por bicos externos
Classificação:	Link - microjet
Modelo:	MKS-G 260
Máxima pressão:	7 bar
Pressão de trabalho:	0,5 – 6 bar
Vazão de ar:	30 – 50 l / min / bico
Vazão de óleo:	5 – 200 ml / h / bico
Bico empregado:	2 bicos microjet com junção em duas fases, flexíveis e giráveis em 360 graus



Figura 8.2 – Equipamento para aplicação de MQF por bicos externos

ANEXO II

Calibração do sistema de telemetria

A calibração do sistema de telemetria foi realizada dentro da metodologia de calibração utilizada pelo WZL, chamada calibração água gelo / água fervendo. A calibração se baseia em averiguar a temperatura para estas duas condições, onde os pontos de temperatura já são previamente conhecidos. Entretanto, para uma maior confiabilidade dos valores medidos, o processo de calibração foi acompanhado por um termômetro de precisão com uma resolução de 0,1 °C.

Com o sistema de telemetria montado, foram medidas as temperaturas da água com gelo e depois com a água fervendo. De posse destes valores, juntamente com os dados do termômetro de precisão, foram calculados os valores de correção do sistema de medição, amplificação e do software de medição Diadem, para que a medição com o software permitisse o registro dos dados finais já corrigidos.

Para cada par do sistema / termo-elemento, foram efetuadas medidas de calibração e tratamento dos dados. Em cada medida, foram recobertos os furos de refrigeração interna da ferramenta com uma termo-pasta, para que houvesse maior confiabilidade na equivalência de temperatura. Assim, esta metodologia foi seguida para a totalidade dos ensaios desenvolvidos com o sistema de telemetria.

Calibração do sistema de medição de temperatura na peça

A calibração dos termo-elementos e do sistema de aquisição de dados foi realizada de forma semelhante a desenvolvida para a calibração dos ensaios de medição de

temperatura na broca. A diferença permaneceu na transmissão dos sinais dos sensores que foram ligados diretamente num leitor de sinais, antes da amplificação dos mesmos.