

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

**APLICAÇÃO DE MÍNIMAS QUANTIDADES DE FLUIDO DE CORTE NOS
PROCESSOS DE FURAÇÃO E ROSQUEAMENTO INTERNO DE EIXOS
PARA MOTORES ELÉTRICOS**

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

ANDRÉ LUIZ KLAUBERG

FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 2009

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

**APLICAÇÃO DE MÍNIMAS QUANTIDADES DE FLUIDO DE CORTE NOS
PROCESSOS DE FURAÇÃO E ROSQUEAMENTO INTERNO DE EIXOS
PARA MOTORES ELÉTRICOS**

ANDRÉ LUIZ KLAUBERG

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO, SENDO APROVADA EM SUA FORMA FINAL.

Prof. Dr-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Orientador

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D. Sc.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. João C. E. Ferreira, Ph. D.
Presidente

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Prof. Alexandre Magno De Paula Dias, Dr.-Ing.

**“Ainda que eu tivesse toda a ciência
e conhecimento, sem Amor nada serei”
(Apóstolo Paulo na carta aos Coríntios, capítulo 13)**

**Dedico este trabalho acima
de tudo a Jesus Cristo,
o Autor da Vida.**

AGRADECIMENTOS

Aos colegas de empresa, em especial, os senhores Régis Carvalho Esteves, Giovani Jacques Beltrame, Manoel Henrique Baruffi e Leandro Roth, por todo o incentivo e por seu empenho em promover os recursos necessários para o desenvolvimento deste trabalho dentro da empresa.

Ao meu orientador, o Prof. Dr-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, por sua compreensão e apoio neste projeto, sem o qual não seria possível realizá-lo.

Aos colegas do Laboratório de Mecânica de Precisão, em especial ao Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng., pelas sugestões na elaboração do trabalho.

Aos fornecedores de ferramentas, fluidos de usinagem e de sistemas de Mínimas Quantidades de Fluido de Corte que ofereceram apoio técnico e logístico aos ensaios realizados.

A minha esposa Cláudia que muito soube me compreender e apoiar, abdicando inúmeras vezes de seus próprios interesses para viabilizar este projeto.

A meus pais e sogros pela acolhida nas viagens a Florianópolis, por todo carinho e apoio de orações.

A minha igreja em Jaraguá do Sul, pelo afeto, pelas orações e pela compreensão nos momentos de ausência.

Acima de tudo a Deus Soberano que me deu saúde, ânimo, e me ajudou nos momentos difíceis dessa caminhada e que me tem presenteado com muitas coisas maravilhosas.

SUMARIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	12
SIMBOLOGIA	13
RESUMO.....	16
ABSTRACT	17
1. INTRODUÇÃO	18
2. ESTADO DA ARTE.....	22
2.1. O PROCESSO DE CORTE.....	22
2.1.1 A interface cavaco-ferramenta.....	23
2.1.2 Geração e distribuição de calor.....	24
2.2. TIPOS DE CAVACOS.....	25
2.3. DESGASTE E AVARIAS DE FERRAMENTA.....	27
2.3.1 Mecanismos de desgaste.....	27
2.3.2 Avarias térmicas e mecânicas.....	27
2.3.3 Formas e grandezas de desgaste.....	28
2.4. VIDA DE FERRAMENTA.....	29
2.5. MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE COM GEOMETRIA DEFINIDA.....	30
2.5.1 Aço-rápido.....	31
2.5.2 Metal-duro.....	32
2.5.3 Revestimentos de ferramentas.....	32
2.6. FURAÇÃO COM FERRAMENTAS DE CORTE DE GEOMETRIA DEFINIDA.....	35
2.6.1 Furação com brocas helicoidais.....	37
2.6.2 Desgastes, avarias e critérios de fim de vida para brocas helicoidais.....	39
2.6.3 Desenvolvimentos em brocas helicoidais para redução ou eliminação de fluidos de corte.....	40
2.7. USINAGEM DE ROSCAS INTERNAS COM FERRAMENTAS DE CORTE DE GEOMETRIA DEFINIDA.....	41
2.7.1 Rosqueamento interno com machos de corte.....	41
2.7.2 Desgastes, avarias e critérios de fim de vida para machos de corte.....	44
2.8. MEIOS AUXILIARES DE CORTE.....	45

2.8.1 Definições e funções.....	45
2.8.2 Efeitos indesejados dos fluidos de corte.....	47
2.8.3 Formas tradicionais de aplicação de fluidos de corte.....	50
2.8.4 Usinagem a seco.....	51
2.8.5 Aplicação de fluidos de corte em mínimas quantidades.....	51
2.8.6 Fluidos de corte para MQFC.....	57
2.8.7 Viabilidade da usinagem a seco ou com MQFC.....	59
2.9. AÇOS DE MÉDIO CARBONO.....	61
2.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O ESTADO DA ARTE.....	62
3. METODOLOGIA E APARATO EXPERIMENTAL.....	63
3.1. CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES USINADOS.....	64
3.2. MÁQUINA-FERRAMENTA E DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO DOS EIXOS.....	66
3.3. PREPARAÇÃO E ESTRATÉGIA DE USINAGEM.....	68
3.4. FLUIDOS DE CORTE E FORMAS DE APLICAÇÃO.....	69
3.5. PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO.....	73
3.6. ENSAIOS DE FURAÇÃO.....	74
3.7. ENSAIOS DE ROSQUEAMENTO.....	80
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	83
4.1. ENSAIOS DE VIDA EM FURAÇÃO.....	83
4.2. ENSAIOS DE VIDA EM ROSQUEAMENTO INTERNO.....	96
4.3. CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES SOBRE OS ENSAIOS	101
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	103
6. REFERÊNCIAS.....	109
ANEXOS.....	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Consumo de material lubrificante e fluidos de corte na indústria metal-mecânica alemã em 1999 [4].....	19
Figura 1-2 – Distribuição de custos relativos aos fluidos de corte numa indústria automobilística com sistema centralizado (adaptado de Klocke e Gerschwiler <i>apud</i> [33]).....	20
Figura 2-1 – Formação do cavaco no Corte Ortogonal, adaptado de [7].	22
Figura 2-2 – Distribuição típica do calor gerado por ferramentas de corte de geometria definida [12]	24
Figura 2-3 – Distribuição de calor em função da velocidade de corte no brochamento de aço com médio carbono [13]	25
Figura 2-4 – Classificação dos cavacos quanto à forma, segundo a ISO 3685 <i>apud</i> Stoeterau [7]	26
Figura 2-5 – Fatores de influência na forma dos cavacos [7]	26
Figura 2-6 – Importância de atuação dos mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte, segundo König e Klocke <i>apud</i> Stoeterau [15].....	27
Figura 2-7 – Trincas típicas em metal-duro submetido a variações térmicas [14].....	28
Figura 2-8 – Grandezas de desgaste de cratera, flanco e entalhe [15].	29
Figura 2-9 – Principais fatores que influenciam na vida de ferramentas (adaptado de [8]).....	30
Figura 2-10 – Comparação entre revestimentos com multicamada e com gradiente [19]	34
Figura 2-11 – Estruturação nanocomposta dos cristais de TiAlN em matriz amorfa de Si ₃ N ₄ - revestimento comercial nACo®[19]	35
Figura 2-12 – Movimentos no processo de furação com ferramentas de corte de geometria definida [21].	36
Figura 2-13 – Principais partes constituintes de uma broca helicoidal com haste cônica ou cilíndrica [21]	36
Figura 2-14 – Elementos geométricos do topo de uma broca helicoidal [6].....	37
Figura 2-15 – Outros elementos geométricos de uma broca helicoidal [6].....	38
Figura 2-16 – Diferentes afiações do gume transversal de brocas [6].	39
Figura 2-17 – Exemplos de grandezas de desgaste em brocas helicoidais, segundo Bork <i>apud</i> de Andrade [24]	39

Figura 2-18 – Terminologia de machos de corte, segundo a OSG [29].....	42
Figura 2-19 – Características da entrada de um macho de corte segundo a Titex Plus <i>apud</i> Mota [5]	42
Figura 2-20 – Tipos principais de machos de corte quanto à configuração do canal [29]	43
Figura 2-21 – Principais formas de desgastes e avarias em machos de corte [30].....	44
Figura 2-22 – Manchas de dermatite ocupacional [35].....	49
Figura 2-23 – Direções possíveis de aplicação de fluidos de corte [8]	50
Figura 2-24 – Broca com refrigeração por jato interno [36]	50
Figura 2-25 – Broca utilizada na furação a seco com um canal obstruído pela soldagem de cavacos [4]	52
Figura 2-26 – Possibilidades de fornecimento da mistura ar-líquido em MQFC [46]..	53
Figura 2-27 – Recomendação da Lubrimat <i>apud</i> Zeilmann para o posicionamento do bico externo à broca [4].....	54
Figura 2-28 – Corte de um bico atomizador para MQFC externa [35].....	55
Figura 2-29 – Sistema com tanque pressurizado e <i>venturi</i> (esquerda) e sistema com micro-bombas pneumáticas (direita) [43].....	55
Figura 2-30 – MQFC externa sem atomização para ferramentas de pequeno diâmetro [43]	56
Figura 2-31 – Esquema de um equipamento de MQFC interna [26]	56
Figura 2-32 – Classificação dos materiais metálicos adaptada de Pannoni [57].....	62
Figura 3-1 – Etapas principais de usinagem de um eixo para motores elétricos.....	63
Figura 3-2 – Croqui de um eixo para motor elétrico em aço ABNT 1045 com duas extremidades roscadas	65
Figura 3-3 – Calibrador, código 30435 HEF OS 7200C, para controle de roscas métricas M8x1,25	66
Figura 3-4 – Centro de usinagem modelo Ultimill V3000.....	67
Figura 3-5 – Dispositivo para fixação de eixos na etapa de furação e rosqueamento de suas extremidades	68
Figura 3-6 – Dimensões do furo de centro na extremidade de eixos antes da etapa de furar e roscar	69
Figura 3-7 – Esquema de funcionamento do gerador de MQFC.....	71
Figura 3-8 – Foto do equipamento gerador de MQFC, modelo LubriLean VarioPlus .	71

Figura 3-9 – Válvula com acionamento por solenóide para liberação e bloqueio do <i>spray</i> pelo eixo-árvore da máquina-ferramenta.....	72
Figura 3-10 – Bomba para alimentação interna do jato de fluido de corte	72
Figura 3-11 – Máquina de <i>preset</i> de ferramentas.....	74
Figura 3-12 – Revestimento da classe KC7315 [6].....	76
Figura 3-13 – Forma dos cavacos normalmente gerados pelo processo de furação de eixos.....	76
Figura 3-14 – Estéreo-microscópio modelo DV4 da empresa Zeiss.....	77
Figura 3-15 – Bancada com microscópio acoplado à câmera digital e PC com software analisador de imagens.....	78
Figura 3-16 – Distância aproximada entre sulcos em uma guia de broca desgastada. Medição feita com auxílio do software Image-Pro Express.....	78
Figura 4-1 – Vida de brocas nas condições 1 a 3 da Tabela 3-2, utilizando jato interno de fluido Alusol XT a 20% de concentração.....	83
Figura 4-2 – Falhas no fim de vida de uma broca testada na condição 1.....	84
Figura 4-3 – Vida de brocas nas condições 1 e 4	86
Figura 4-4 – Broca de geometria RT100U testada na condição 4 (MQFC).....	87
Figura 4-5 – Vida de brocas nas condições 4, 5 e 6	88
Figura 4-6 – Vida de brocas com e sem preparação de gume [19]	89
Figura 4-7 – Vida de brocas com diferentes revestimentos para furação em aço Ck 45 [14]	90
Figura 4-8 – Quina de broca sem <i>honing</i> (acima) e com <i>honing</i> (abaixo) [19]	90
Figura 4-9 – Desgaste nas guias de broca com geometria B256A - HPC após 160,2m furados em MQFC.....	91
Figura 4-10 – Lascamento em broca de geometria B256A - HPC com refrigeração por jato interno após furar 21,1 metros (Condição 9).....	91
Figura 4-11 – Vida de brocas nas condições 8 e 9.	92
Figura 4-12 – Craterização de uma broca de geometria B256A – HPC testada na condição 8 (em MQFC) após 160,2 metros furados.....	93
Figura 4-13 – Vida de diferentes geometrias de brocas nas condições 4, 7 e 8.....	94
Figura 4-14 – Desgaste e lascamentos nas guias de broca de geometria 2 (Condição 7)	94
Figura 4-15 – Craterização com largura de 23 μ m junto ao gume principal no fim de vida de uma broca com geometria 2 (MQFC).....	95

Figura 4-16 – Etapa de verificação de vida de brocas com diâmetro 8,7 mm	95
Figura 4-17 – Vida de machos testados nas condições 1 a 3 da etapa preliminar.....	97
Figura 4-18 – Falhas em macho de geometria V-40, com revestimento TiCN e TiN, empregando MQFC	98
Figura 4-19 – Vida de machos testados nas condições 1 e 4 a 6 da etapa preliminar...	99
Figura 4-20 – Vida de machos testados nas condições 7 a 9 da etapa preliminar.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 – Principais riscos ambientais decorrentes do uso, manuseio e descarte de fluidos de corte utilizados em processos de usinagem, segundo Dias [2].	18
Tabela 2-1 – Propriedades de alguns revestimentos comerciais [20].	35
Tabela 2-2 – Alguns termos comumente usados para MQFC [44].	52
Tabela 2-3 – Nichos de aplicação de MQFC [3].	59
Tabela 2-4 – Exemplos de desenvolvimentos ligados ao projeto " <i>Forschung für die Produktion von Morgen</i> " [43].	61
Tabela 3-1 – Propriedades do aço ABNT 1045 utilizado nos ensaios.	65
Tabela 3-2 – Ensaio da primeira etapa de furação.	79
Tabela 3-3 – Ensaio da segunda etapa de furação.	79
Tabela 3-4 – Propriedades dos revestimentos AlboNiT® e nACo®.	80
Tabela 3-5 – Ensaio da terceira etapa de furação.	80
Tabela 3-6 – Ensaio de rosqueamento preliminares.	82
Tabela 3-7 – Experimento fatorial de rosqueamento.	82
Tabela 4-1 – Percurso total furado obtido nos ensaios da segunda etapa (valores em metros).	85
Tabela 4-2 – Coeficientes da ANOVA nos ensaios de furação da segunda etapa.	85
Tabela 4-3 – Aplicação do teste de Tukey às médias de vida de brocas testadas.	86
Tabela 4-4 – Coeficientes da ANOVA do experimento fatorial de rosqueamento.	101

SIMBOLOGIA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
ANOVA	Analysis of Variance
ASSAB	Associated Swedish Steels AB
BGI	Bodenmanagement und Geoinformation Informationen
BTA	Boring and Trepanning Association
C	Carbono
CNC	Computer Numerical Controlled
Co	Cobalto
Cr	Cromo
CVD	Chemical Vapor Deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EIA	Electronics Industry Association
EP	Extreme Pressure (Extrema Pressão)
Fe	Ferro
Fe ₃ C	Cementita (Carboneto de Ferro)
HVBG	Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPT	Institut für Produktionstechnologie
ISO	International Organization for Standardization
LARC	Lateral Rotating Arc Cathodes
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
MMKS	Minimalmengenkühlsmierung
MMS	Minimalmengenschmierung
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MoS ₂	Bissulfeto de Molibdênio
MQCL	Minimal Quantity Cooling Lubrication
MQF	Mínimas Quantidades de Fluido
MQFC	Mínimas Quantidades de Fluido de Corte

NBR	Norma Brasileira
Ni	Níquel
P	Fósforo
PVD	Physical Vapor Deposition
QMFC	Quantidade Mínima de Fluido de Corte
QRFC	Quantidade Reduzida de Fluido de Corte
RQL	Reduced Quantity Lubrication
S	Enxofre
SAE	Society of Automotive Engineers
Si	Silício
(Ta, Nb)C	Carboneto de Tântalo e Nióbio
TiAlCN	Carbonitreto de Titânio e Alumínio
TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
TiO ₂	Óxido de Titânio
V	Vanádio
VC	Carboneto de Vanádio
W	Tungstênio
WC	Carboneto de Tungstênio
a-Si ₃ N ₄	Nitreto de Silício Amorfo
nc-AlCrN	Nitreto de Alumínio e Cromo Nanocomposto
nc-TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio Nanocomposto

F _{calculado}	[-]	Valor da função F de Snecedor calculado
F _{crítico}	[-]	Valor da função F de Snecedor crítico
H	[mm]	Desgaste das guias
KB	[mm]	Largura de cratera
Kb	[mm]	Desgaste de cratera em broca
KF	[mm]	Largura do lábio no desgaste de cratera
KM	[mm]	Distância da borda da ferramenta ao centro da cratera

KT	[mm]	Profundidade de cratera
Pm	[mm]	Largura de lascamento do gume transversal
Pt	[mm]	Altura de lascamento do gume transversal
QMR	[m ²]	Quadrado médio do resíduo
SV _α	[mm]	Deslocamento lateral do gume na direção do flanco
SV _γ	[mm]	Deslocamento lateral do gume na direção da face
VB	[mm]	Largura média de desgaste de flanco
VB _{Max}	[mm]	Largura máxima de desgaste de flanco
VB _{Med}	[mm]	Largura de desgaste de flanco no ponto médio
d.m.s.	[m]	Diferença mínima significativa
h	[mm]	Espessura do material removido
h _{ch}	[mm]	Espessura do cavaco

RESUMO

A busca por alternativas para completa eliminação ou redução drástica no consumo de meios auxiliares de corte físicos (fluidos de corte) é um tema que vem sendo estudado no meio acadêmico desde o final do século XX, em decorrência da divulgação de pesquisas que revelam o efeito sócio-ambiental negativo gerado por estes fluidos. À medida que a sociedade tomou consciência do problema, criaram-se legislações sociais e ambientais mais rígidas, inicialmente em países da Europa, no Japão e nos Estados Unidos, aumentando, assim, os custos de manuseio e descarte dos fluidos de corte. Desenvolvimentos recentes em tecnologia de ferramentas, revestimentos e máquinas-ferramenta criaram alternativas mais econômicas que minimizam os efeitos indesejáveis da falta total ou parcial de fluidos de corte. Em vista disso, aplicações industriais de usinagem a seco ou com mínimas quantidades de fluido de corte vêm se difundindo em muitos países. No entanto, no Brasil a tendência ainda é incipiente e as publicações, em sua grande maioria, se restringem a estudos acadêmicos. Este trabalho visa contribuir para a difusão da aplicação industrial de mínimas quantidades de fluido de corte na indústria brasileira ao empregá-la em uma etapa do processo de fabricação seriada de eixos de aço ABNT 1045 para motores elétricos. A etapa contempla a furação e rosqueamento de roscas M8x1,25 e M10x1,5, empregando brocas de metal-duro e machos de aço-rápido em um centro de usinagem. Tanto na furação como no rosqueamento, foram comparadas diferentes concepções geométricas de ferramentas e revestimentos em termos de vida, de acordo com critérios pré-estabelecidos. Verificou-se que a utilização de jato de fluido de corte, mesmo através da ferramenta, é prejudicial à vida das brocas na aplicação estudada; que a geometria com gume transversal em formato “S” e com proteção das quinas aumenta significativamente a vida na furação com mínimas quantidades de fluido de corte (MQFC); e que os revestimentos de TiAlN se adequam bem à aplicação, especialmente a estrutura multicamada convencional, sem evidências de incremento na vida ao empregar uma estrutura nanocomposta com alto teor de alumínio. No rosqueamento, as variações de vida foram menores, mas o controle de cavacos mostrou-se crítico na maioria das geometrias testadas. Somente uma geometria de aço-rápido sinterizado, com revestimento TiCN e TiN em MQFC alia controle satisfatório de cavacos a uma vida superior à obtida com a ferramenta inicialmente utilizada com jato de fluido de corte.

ABSTRACT

The searching for alternatives to consumption's complete elimination or drastic reduction of physical cutting auxiliary media (cutting fluids) is an issue that has been studied since the end of the XX century in academic environment, regarding the spreading of researches that shows the social and environmental negative effects generated by these fluids. As much acknowledgement the society got about the problem, as harder social and environmental policy has been created, beginning from countries in Europe, in Japan and in United States, increasing, thus, the costs related to handling and discarding cutting fluid. Recent developments in tool technology, coatings and machine-tools created more economical friendly options that minimize the undesired effects for the total or partial lack of cutting fluids. In sight of this, industrial applications of dry machining or minimal quantity cutting fluids had been spread out in many countries. However, in Brazil this tendency is still incipient and most of publications refer only to academic studies. This work aims to contribute for spreading out the industrial application of minimal quantity cutting fluids in Brazilian industry by applying it to a serial manufacturing process step of ABNT 1045 steel shafts for electrical motors. The step consist of drilling and tapping M8x,125 and M10x1,5 threads, using carbide drills and high speed steel taps in a machining center. Both drilling and tapping, compared different tool shape conceptions and coatings in life terms, according to each pre-established criteria. It was verified that the cutting fluid jet use, even through the tool, is harmful for the drill life in the application studied; that the "S" form for the transversal edge shape and corner protection increases significantly the life in minimal quantity cutting fluid drilling (MQCF); and that TiAlN coatings adjust fine to the application, specially the multilayer conventional structure, without evidences of life increasing using a nanocomposed structure with high aluminum content. In tapping, the tool life variations where lower, but the chip control revealed itself critical, in major shapes tested. Only one shape of sinterized high speed steel, with TiCN and TiN coating in MQCF unite satisfactory chip control with superior life against the original tool using cutting fluid jet.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No século XIX, Northcott e Taylor expuseram os primeiros trabalhos técnicos relativos aos fluidos de corte, o que na época tornou possível a usinagem seriada de diversos componentes industriais e trouxe incremento significativo à produtividade [16]. O século XX foi então marcado pelo intenso desenvolvimento, aplicação e aperfeiçoamento destes meios auxiliares de corte, onde diversos tipos foram desenvolvidos, aplicados e aperfeiçoados segundo necessidades específicas de cada operação de usinagem.

Por outro lado, o gerenciamento dos fluidos de corte desde a aquisição, manutenção de instalações e até o descarte envolve custos que nos últimos anos estão se tornando mais significativos, em função da crescente pressão da sociedade em minorar os danos ao meio ambiente e aos trabalhadores em geral. Segundo Teixeira [1], os fluidos de corte podem ser responsabilizados por grande parte das doenças desenvolvidas em trabalhadores da indústria metal-mecânica. A contaminação do solo, da água, do ar e dos trabalhadores são reflexos das várias etapas do ciclo de utilização e descarte de fluidos de corte, como sugere o resumo da **Tabela 1-1**.

Tabela 1-1 – Principais riscos ambientais decorrentes do uso, manuseio e descarte de fluidos de corte utilizados em processos de usinagem, segundo Dias [2].

Atividade	Aspectos Ambientais	Impacto no Ambiente
Armazenagem	Vazamento de resíduos líquidos	Poluição do solo e corpos de água
Preparação do fluido de corte (miscível em água)	Contato com a pele do operador e inalação de vapores	Doenças respiratórias e de pele
Etapas do sistema produtivo	Respingos e contato com a pele do operador; Vazamentos para rede de coleta de esgoto; Formação de névoa e vapores; Formação de lamas de retificação	Diversas doenças e irritações de pele (dermatites e eczemas) do operador, e doenças respiratórias; Contaminação de rios e solos
Armazenagem, transporte e descarte de cavaco como sucata de fundição	Vazamentos de fluidos de corte em terrenos e estradas; emissões de gases tóxicos na atmosfera	Contaminação de rios, solos e ar atmosférico
Armazenagem e descarte de resíduos de fluido de corte	Vazamentos de resíduos para o meio ambiente; Eliminação de resíduos em local não autorizado	Contaminação de rios e solos

Grandes quantidades de água são empregadas na composição dos fluidos de corte miscíveis em água amplamente utilizados pela indústria. A **Figura 1-1** mostra um estudo realizado na indústria alemã há quase dez anos, onde foi estimado um consumo anual entre 371.888 e 991.700 toneladas de água tratada. Há previsões recentes, veiculadas pelos principais meios de comunicação de massa, de que a água potável se tornará um recurso escasso em muitas regiões do planeta dentro de poucas décadas. Isso potencializa a importância de ações que minimizem o emprego deste recurso em processos industriais.

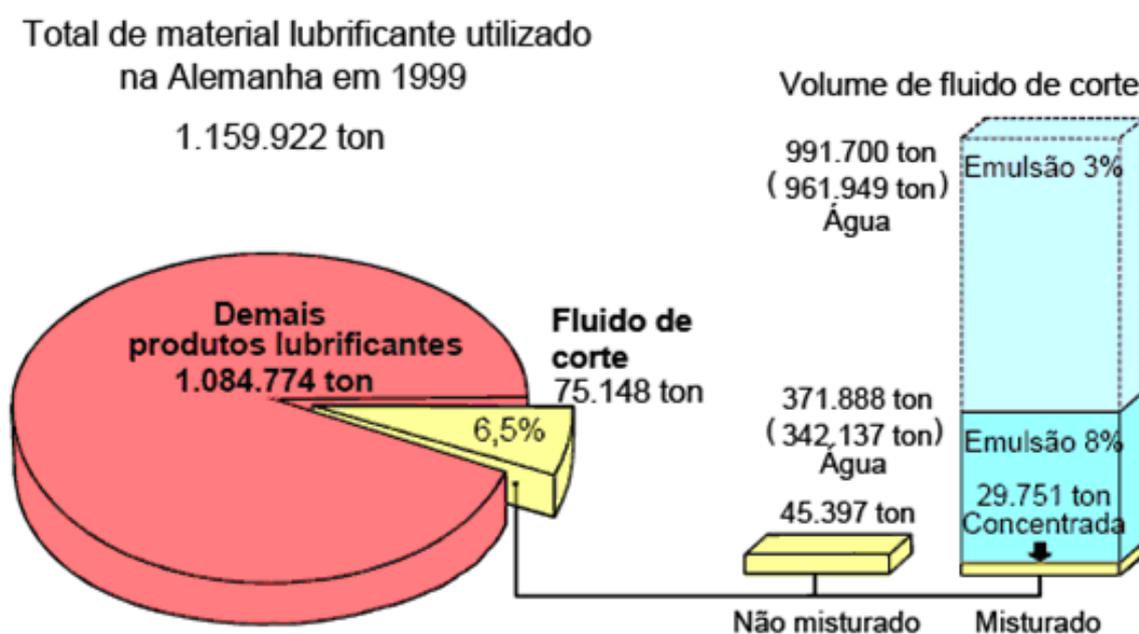


Figura 1-1 – Consumo de material lubrificante e fluidos de corte na indústria metal-mecânica alemã em 1999 [4].

Estudos mostram que entre 7 a 17% dos custos de fabricação estão ligados aos fluidos de corte [3]. Este montante não considera somente os custos de aquisição, mas inclui outros custos relacionados, como exemplificado na **Figura 1-2**. Diferenças de valores estão relacionadas com o porte da indústria, legislação local e peculiaridades de processo de cada empresa. Seja qual for o contexto e a forma de estratificar estes custos, eles não são inexpressivos. Há empresas onde a complexidade do gerenciamento e a qualidade exigida dos fluidos de corte requer a manutenção de equipes especializadas.

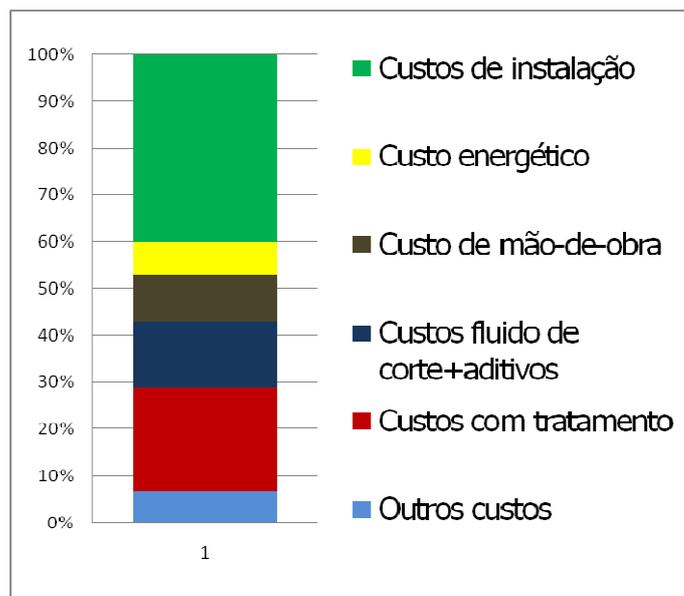


Figura 1-2 – Distribuição de custos relativos aos fluidos de corte numa indústria automobilística com sistema centralizado (adaptado de Klocke e Gerschwiler *apud* [33]).

Considerando o exposto, os fatores ambientais, inclusive os de saúde ocupacional, e aspectos econômicos estimulam a redução ou até a eliminação dos fluidos de corte em vários processos de usinagem. Pesquisas nessa linha têm sido desenvolvidas no âmbito acadêmico há cerca de duas décadas e já são aplicadas com sucesso por indústrias em países como Estados Unidos, Alemanha e Japão. A chamada Usinagem a Seco e a Usinagem com Mínimas Quantidades de Fluido de Corte – MQFC - que serão detalhadas no próximo capítulo, são as duas vertentes mais difundidas no meio industrial internacional como alternativas vantajosas para vários processos de usinagem. Novas tecnologias de materiais, de geometria de ferramentas e de periféricos contribuem para tal resultado positivo. No Brasil, essas alternativas também são discutidas em alguns trabalhos acadêmicos, porém, especialmente em relação à MQFC, poucos trabalhos contemplam informações oriundas da manufatura seriada nacional.

Dentre os processos de usinagem empregados na indústria, a furação e o rosqueamento interno com machos de corte foram proporcionalmente pouco estudados pela literatura acadêmica quando comparados ao torneamento e o fresamento [5]. A complexidade de variáveis envolvidas e o menor interesse historicamente demonstrado pela indústria são duas das principais razões. Curiosamente, furar e roscar costumam estar entre as etapas finais de fabricação de um componente, onde já se agregou a maior parte do custo de fabricação [5]. Isso significa que a baixa eficiência tecnológica

atualmente empregada pela maioria das indústrias em furação e rosqueamento interno com machos de corte repercute em elevados custos de operação e de refugo. Segundo informações transmitidas em palestra da empresa Kennametal [6], a furação representa 23% do consumo mundial de ferramentas de corte. Com apenas 2% a menos que o processo de torneamento, considerado o maior consumidor de ferramentas da atualidade, sua importância se destaca até mesmo em relação ao fresamento. Outro dado interessante da palestra é que entre 30% e 50% do tempo de corte de um centro de usinagem são gastos com furação e que 72% das ferramentas ainda são de aço-rápido, mostrando o grande potencial de otimização existente. Em muitos casos, o processo de furação antecede o rosqueamento interno com machos de corte.

Este trabalho dedicou-se a comparar a usinagem tradicional empregando jato de fluido de corte, com a usinagem empregando MQFC, na etapa de furação e rosqueamento de eixos de aço ABNT 1045 que compõem motores elétricos. A empresa-piloto onde o trabalho foi desenvolvido usina eixos em pequenos lotes e os ensaios foram realizados na planta industrial, contemplando restrições tecnológicas e econômicas do ambiente produtivo em questão. As comparações se deram em termos de parâmetros de vida de ferramentas, empregando modernos geradores de *spray*, materiais, geometrias e revestimentos de ferramentas, selecionados com base em indicações da literatura para emprego de MQFC. Pretende-se assim verificar o nível de coerência entre as recomendações de outros pesquisadores e os resultados dos ensaios neste trabalho. Espera-se, com isso, promover uma aproximação da indústria brasileira em relação a essas tecnologias sócio-ecologicamente responsáveis.

O capítulo dois apresenta uma breve revisão sobre o estado da arte. São abordados os fundamentos relativos às grandezas de entrada e saída dos processos de usinagem; os materiais empregados para ferramentas de corte; as peculiaridades do processo de furação e de rosqueamento interno com machos de corte; os meios auxiliares de corte (fluidos de corte) e sua forma de aplicação; e os materiais para fabricação de eixos de motores elétricos. No capítulo três foi descrita a metodologia e o aparato experimental empregado nos ensaios de vida de ferramenta na furação e no rosqueamento interno com machos de corte. O capítulo quatro apresenta e discute os resultados dos ensaios de vida confrontando-os com a literatura relacionada para que então sejam tecidas as considerações finais no capítulo cinco.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1. O PROCESSO DE CORTE

No intuito de compreender os mecanismos de corte e, conseqüentemente a formação de cavacos, é usual fazer simplificações em relação ao processo. Utiliza-se freqüentemente o conceito de Corte Ortogonal, que pressupõe que o gume cortante é reto, normal à direção de corte e normal à direção de avanço. Dessa maneira, a formação do cavaco pode ser considerada um fenômeno bidimensional no plano de trabalho, como mostrado na **Figura 2-1**.

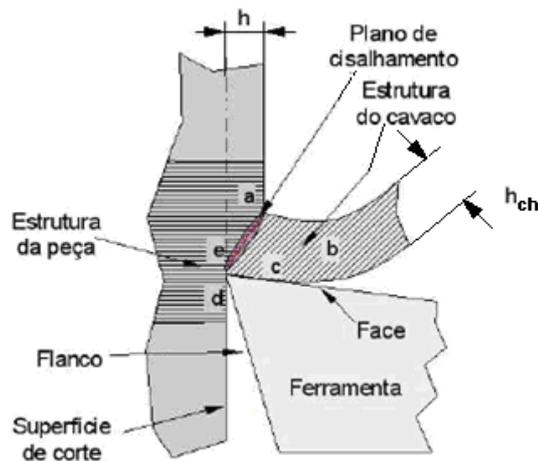


Figura 2-1 – Formação do cavaco no Corte Ortogonal, adaptado de [7].

A ação da ferramenta inicialmente recalca parte do material da peça usinada até ultrapassar o limite de escoamento do material, que se deforma plasticamente na zona de cisalhamento “a”. O chamado “plano de cisalhamento” delimita a transição na direção de escoamento do material da peça e do cavaco, cuja separação, em materiais dúcteis, efetivamente ocorre no gume da ferramenta (“e”). As regiões “d” e “c” se caracterizam por atrito elevado, gerando grandes deformações plásticas. Verifica-se experimentalmente que a espessura do cavaco (h_{ch}) é maior que a espessura do material a ser removido (h). Por conseqüência, a velocidade de saída do cavaco é menor que a velocidade de corte.

2.1.1 A interface cavaco-ferramenta

As teorias mais antigas sobre o processo de corte concentravam a atenção somente em torno do plano de cisalhamento [8]. Entretanto, os fenômenos que ocorrem na interface entre o cavaco e a ferramenta são de suma importância no estudo do processo de corte. Elevada pressão, área de contato reduzida, velocidade elevada de saída do cavaco, altas temperaturas e esforços de atrito elevados são exemplos de características que até hoje desafiam o monitoramento em tempo real. O estudo desse tópico requer uma breve revisão sobre condições de contato, formação do gume postiço e dos fenômenos de atrito e lubrificação.

Através da análise de micrografias da raiz do cavaco obtidas com auxílio de dispositivo tipo “*quick-stop*”, Trent *apud* Machado e da Silva [8] verificou, na maioria dos materiais por ele usinados com ferramentas de aço-rápido e metal-duro, a presença de porções significativas de contato intenso na interface cavaco-ferramenta. Essas regiões foram denominadas de “Zona de Aderência” e apresentam um gradiente de velocidade de escoamento do material. A camada em contato com a ferramenta é estacionária e a velocidade aumenta na medida em que se afasta da superfície de contato. Na periferia dessa região, as pressões de contato eram menores, de forma que o contato ocorria apenas entre os picos das duas superfícies. Como as ligações entre as superfícies do cavaco e da ferramenta são mais fracas, ocorre movimento relativo sem deformações significativas. Essa região foi chamada de “Zona de Escorregamento”. Não há consenso sobre a disposição dessas zonas na interface cavaco-ferramenta. Trabalhos de diferentes pesquisadores como Trent, Doyle e Wright *apud* Machado e da Silva [8] defendem diferentes configurações em função de características físico-químicas dos materiais da ferramenta e peça, de características geométricas do par ferramenta-peça, de parâmetros de corte empregados e da presença de contaminantes na região que reduzam a afinidade química. A presença de certos lubrificantes sólidos na composição da peça pode suprimir a existência da Zona de Aderência pela formação de um filme na interface.

Em condições especiais de usinagem, geralmente em baixas velocidades de corte, pode ocorrer também a formação do chamado gume postiço [9]. Trata-se de uma porção de material aderido à superfície de saída da ferramenta que encrua e cresce até um tamanho crítico, onde é então cisalhado e arrastado para fora da região de corte.

Um aspecto relevante para redução do atrito na interface cavaco-ferramenta é o regime de lubrificação predominante. Czichos e Habig *apud* Mang e Dresel [10] mencionam quatro diferentes regimes de atrito em função das situações de contato e lubrificação existentes:

Boundary friction, Mixed film friction, Elastohydrodynamic lubrication e Hydrodynamic lubrication. O primeiro corresponde à ausência total de meio lubrificante entre as duas superfícies em atrito. O segundo se refere a uma condição em que o filme lubrificante é tão fino que ainda permite contato entre alguns pontos salientes das duas superfícies. No terceiro regime, o filme lubrificante é contínuo, mas sujeito a fenômenos elásticos relacionados à sua pequena espessura. Por fim, o quarto se caracteriza por um filme espesso. Os autores elucidam que o atrito mínimo ocorre na transição do segundo para o terceiro regime, quando o filme é suficientemente fino para minimizar a dissipação de energia por atrito viscoso e suficientemente espesso para separar completamente as duas superfícies.

A penetração de lubrificantes na Zona de Aderência é um tema polêmico entre os pesquisadores. Como citado por Machado e da Silva [11], alguns pesquisadores (Trent, Childs e Rowe) defendem que o lubrificante não tem espaço físico para penetrar na Zona de Aderência, enquanto outros alegam que o lubrificante penetra nessa região por capilaridade (Postnikov) ou pelas laterais (Horne *et alli*). Seja qual for a condição real, a eficácia dos meios auxiliares de corte físicos, que serão discutidos no tópico 2.8, depende de sua penetração na interface cavaco-ferramenta.

2.1.2 Geração e distribuição de calor

Praticamente todo trabalho de usinagem é convertido em calor. Três regiões promovem a geração desse calor: a região em torno do plano de cisalhamento, a interface cavaco-ferramenta e a interface entre a peça e o flanco da ferramenta. A **Figura 2-2** mostra uma distribuição típica verificada nos processos de usinagem com ferramentas de geometria definida. Apesar de uma pequena parcela ser transferida para a ferramenta, a temperatura associada a este calor pode chegar a 1100°C [8], comprometendo severamente a resistência da ferramenta.

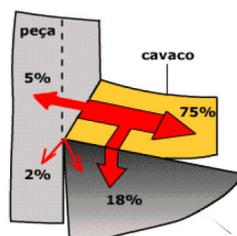


Figura 2-2 – Distribuição típica do calor gerado por ferramentas de corte de geometria definida [12].

As proporções da **Figura 2-2** podem ser alteradas em função dos parâmetros de corte adotados, especialmente da velocidade de corte. Pesquisadores indicam um aumento da proporção transferida para o cavaco com o incremento da velocidade de corte [13, 14]. Ensaio didáticos de torneamento realizados para alunos de Engenharia no Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP também demonstram esse fenômeno. A **Figura 2-3** apresenta um estudo da distribuição de calor em função da velocidade de corte para uma operação de brochamento sem emprego de um meio auxiliar de corte. Em velocidades da ordem de 5 m/min, mais de 30% do calor fica na peça, enquanto essa proporção cai para menos de 5% em velocidades acima de 100m/min.

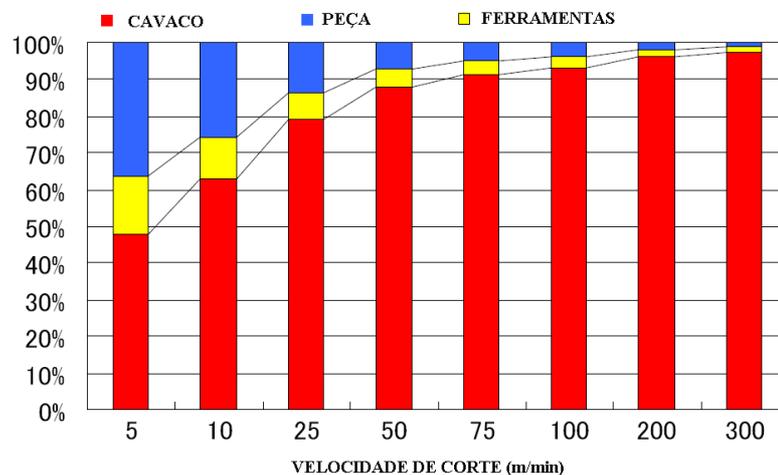


Figura 2-3 – Distribuição de calor em função da velocidade de corte no brochamento de aço com médio carbono [13].

2.2. TIPOS DE CAVACOS

Quanto ao tipo, os cavacos podem ser contínuos, lamelares, cisalhados ou arrancados [7]. Os cavacos contínuos são produzidos por materiais com elevada capacidade de deformação, estrutura regular, pequena tendência ao encruamento por deformação, geralmente por ferramentas com grandes ângulos efetivos de usinagem e apresentam um fluxo contínuo de material sem separação de elementos do cavaco. Cavacos lamelares são fortemente indentados e apresentam um fluxo não contínuo de material, provocado por fatores diversos, geralmente produzidos em altas velocidades de corte e grandes avanços. Cavacos cisalhados constituem-se de segmentos formados na região de cisalhamento que

posteriormente caldeiam. Os cavacos arrancados são típicos de materiais frágeis com estrutura irregular, como ferros fundidos e rochas.

A norma ISO 3685 *apud* Stoeterau [7] classifica os cavacos produzidos na usinagem de metais quanto à sua forma (**Figura 2-4**). Conforme resume a **Figura 2-5**, a forma dos cavacos depende de diversas características do processo de usinagem.

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo arruela	5- Cavaco hel. cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhada			

Figura 2-4 – Classificação dos cavacos quanto à forma, segundo a ISO 3685 *apud* Stoeterau [7].

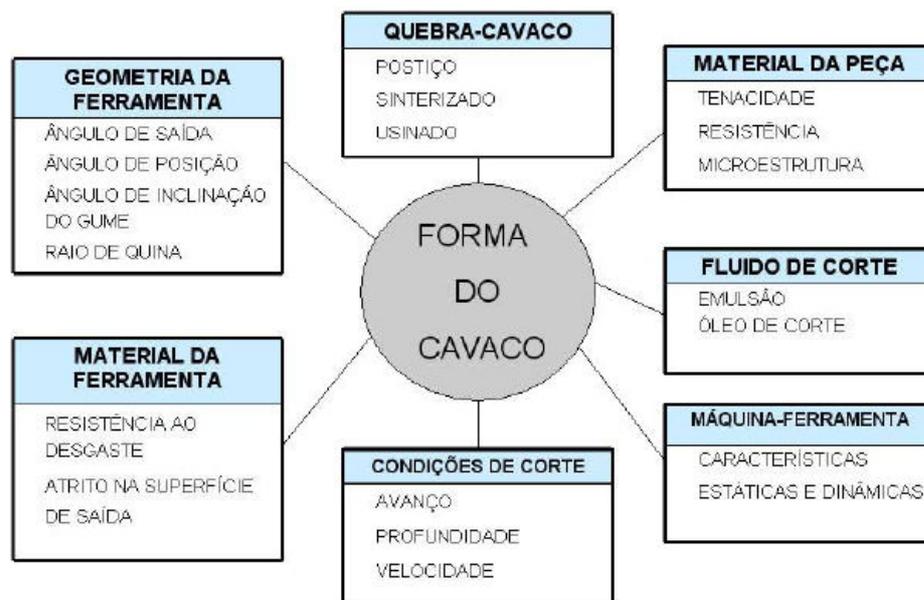


Figura 2-5 – Fatores de influência na forma dos cavacos [7].

2.3. DESGASTE E AVARIAS DE FERRAMENTA

2.3.1 Mecanismos de desgaste

A **Figura 2-6** apresenta um diagrama clássico, onde a importância dos quatro principais mecanismos de desgaste é ilustrada em função da temperatura de corte. Em baixas temperaturas, predomina o mecanismo de adesão, atuando em conjunto com a abrasão. Em temperaturas elevadas, a adesão perde lugar aos mecanismos de difusão e oxidação.

A abrasão ocorre quando há remoção de material da superfície por partículas duras que emergem ou estão entre as superfícies em contato na usinagem. O mecanismo de difusão envolve transferência de átomos de um material para outro, sendo motivado por afinidade química e requer temperaturas elevadas para viabilizar a mobilidade das partículas. O mecanismo de adesão ocorre quando partículas do material da peça soldam-se e são posteriormente removidas da ferramenta, arrastando consigo parte do material. A oxidação é fruto da reação química do material da ferramenta com o oxigênio em altas temperaturas.

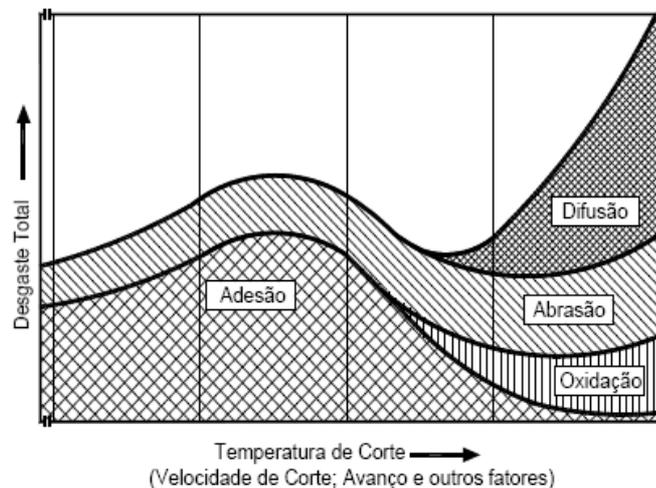


Figura 2-6 – Importância de atuação dos mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte, segundo König e Klocke *apud* Stoeterau [15].

2.3.2 Avarias térmicas e mecânicas

As avarias, ou também denominadas danificações de ferramenta, consistem num processo de destruição da ferramenta de maneira repentina e inesperada, causando colapso catastrófico, lasca ou trinca (fissura) da ferramenta de corte [8]. O colapso catastrófico e a lasca removem quantidades consideráveis de material, enquanto que a trinca inicialmente

promove apenas a abertura de uma fenda na ferramenta. Causas de origem térmica ou mecânica podem estar por trás das avarias. Processos de corte interrompido, como o fresamento, apresentam, além do impacto na entrada e saída dos gumes, ciclos de aquecimento e resfriamento oriundos da atuação intermitente dos gumes [16]. A flutuação cíclica da temperatura na interface cavaco-ferramenta leva a uma modificação também cíclica das tensões na região de corte, o que desencadeia a formação de trincas. No caso das trincas térmicas, sua disposição geralmente é longitudinal (perpendicular ao gume) como mostra a **Figura 2-7**, coincidindo com isotermas observadas na ferramenta. Outros processos, como a furação, onde há restrições de acesso do fluido de corte, também estão sujeitos a ciclos de resfriamento e aquecimento não uniformes ao longo do substrato da ferramenta, cujas tensões térmicas flutuantes desencadeiam a formação de trincas. Machado e da Silva [8] afirmam que a importância das trincas térmicas cresce com o aumento da velocidade de corte, a ponto de tornar-se uma das principais causas de falha das ferramentas em altas temperaturas de corte. A presença de trincas transversais (paralelas ao gume) geralmente é consequência de solicitações mecânicas cíclicas oriundas do impacto entre os gumes e a peça no corte interrompido. Quanto maior a tenacidade do material da ferramenta, menor sua tendência às avarias descritas, desde que não sejam empregadas condições de corte excessivamente severas. Trincas térmicas e mecânicas podem interagir dando origem a lascas e levar ao colapso catastrófico.

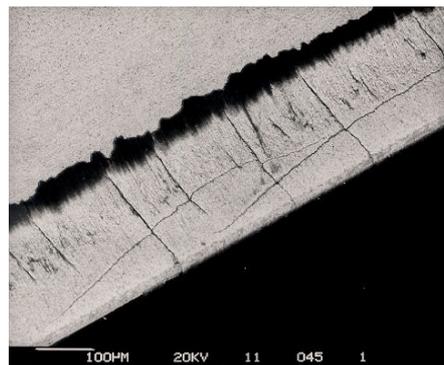


Figura 2-7 – Trincas típicas em metal-duro submetido a variações térmicas [14].

2.3.3 Formas e grandezas de desgaste

Diversas formas de desgaste decorrem dos mecanismos de avaria e de desgaste descritos. Destacam-se aqui apenas três formas principais: desgaste de cratera, desgaste de flanco e desgaste de entalhe. A **Figura 2-8** mostra esquematicamente essas três formas de

desgaste e as principais grandezas usualmente usadas para mensurá-las. O entalhe é medido de maneira semelhante ao VB máximo. A medição do desgaste é importante na definição de alguns critérios de fim de vida de ferramenta, como será discutido no tópico 2.4. Aspectos específicos dos processos de furação e rosqueamento serão abordados nos tópicos 2.6 e 2.7.

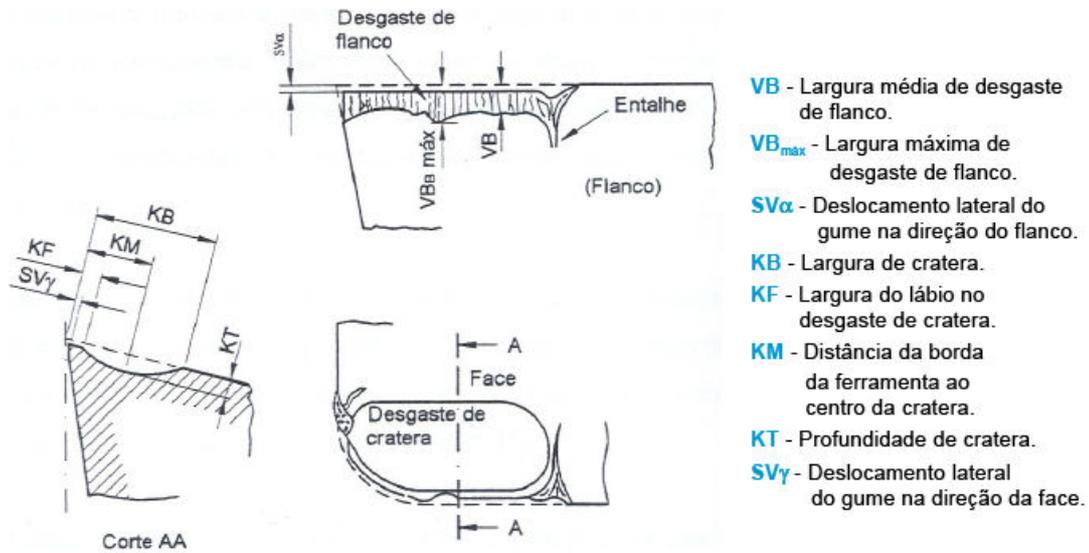


Figura 2-8 – Grandezas de desgaste de cratera, flanco e entalhe [15].

2.4. VIDA DE FERRAMENTA

Ferraresi [17] define a vida de ferramenta como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. Esse critério geralmente busca manter a ferramenta em uso somente enquanto sua utilização é economicamente vantajosa. Alguns dos critérios de fim de vida empregados são [16]:

- Colapso catastrófico da ferramenta;
- Valores pré-definidos das grandezas de desgaste de flanco, de cratera ou entalhe;
- Vibrações (reconhecimento de padrões por monitoramento);
- Parâmetro de rugosidade fora do admissível;
- Alterações na integridade superficial;
- Rebarbas no componente;
- Alterações na forma dos cavacos;
- Alterações dimensionais do componente para fora dos limites toleráveis;

- Alterações nas forças de usinagem (monitoramento);
- Aumento de temperatura.

A vida de ferramenta pode ser expressa de diversas formas: tempo total de trabalho, percurso de corte, volume de material removido, número de peças produzidas, etc. É comum gerar curvas de vida de ferramenta em função da velocidade de corte com o objetivo de determinar as condições econômicas de usinagem de uma ferramenta.

Diversos fatores influem na vida de ferramenta, alguns deles relacionados à peça, outros à ferramenta de corte, outros aos meios auxiliares de corte empregados e outros ainda às condições impostas pela máquina-ferramenta utilizada. A **Figura 2-9** resume alguns dos principais fatores que afetam a vida das ferramentas.

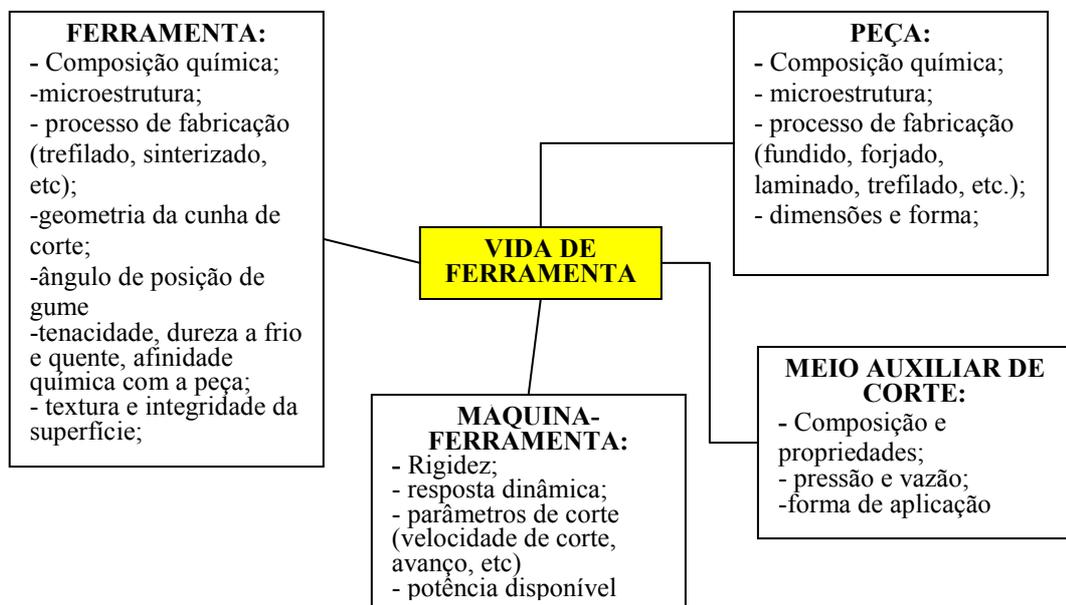


Figura 2-9 – Principais fatores que influenciam na vida de ferramentas (adaptado de [8]).

2.5. MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE COM GEOMETRIA DEFINIDA

Em virtude das severas condições de temperatura e tensões a que as ferramentas de corte são submetidas, surgiram vários materiais para utilização em ferramentas de usinagem no período compreendendo o final do século XIX e boa parte do século XX. Nenhum deles atende todas as características desejadas, razão pela qual existem tantas combinações no mercado. Soluções de compromisso para cada aplicação podem combinar diferentes materiais no substrato e no revestimento da ferramenta, como será discutido no tópico 2.5.3.

Alguns processos, como o torneamento, empregam os mais variados materiais de ferramenta: a cerâmica, o Nitreto de Boro Cúbico, os diamantes monocristalino e policristalino, Stelite, aços-ferramenta, aço-rápido e metal-duro. Em outros, como a furação e o rosqueamento interno com machos de corte discutidos neste trabalho, apenas o aço-rápido e o metal-duro se difundiram.

2.5.1 Aço-rápido

Desenvolvidos por Taylor na virada do século XIX para o século XX, os aços-rápidos são uma evolução dos aços-ferramenta. Empregam como principais elementos de liga o tungstênio (W), o Molibdênio (Mo), o Vanádio (V) e o Cobalto (Co) [16]. Apresentam melhor revenimento que os aços-ferramenta, e atingem durezas entre 60 e 67HRc. São divididos em quatro grupos, de acordo com o teor de W e Mo [16]. O primeiro grupo possui alto teor de W (até 18%) e apresenta boas características de revenimento. O segundo grupo possui menores teores de W (até 12%), porém com crescente teor de V. Apresenta revenimento pouco pior que o primeiro grupo e é indicado para ferramentas de forma complexa por sua ótima maleabilidade e tenacidade. Os dois últimos grupos também apresentam ótima tenacidade e substituem em diferentes proporções o W por Mo. Cada elemento de liga exerce uma influência nas propriedades finais do material. O tungstênio é um formador de carbonetos duros que melhora a resistência ao desgaste e o revenimento. O Molibdênio melhora a temperabilidade, a tenacidade e substitui com menor custo o W. O Vanádio também é formador de carbonetos e melhora a resistência ao desgaste, além de refinar o grão, o que permite melhor afiação dos gumes. O cobalto melhora a dureza a quente dos aços-rápidos.

Por sua excelente tenacidade comparada aos demais materiais de ferramenta modernos, os aços-rápidos ainda são empregados onde há fortes exigências dessa propriedade. Ferramentas grandes e/ou muito complexas podem ter custo proibitivo com materiais de ferramenta mais nobres, o que torna o aço-rápido uma alternativa econômica para esses casos. A possibilidade de aplicar revestimentos sobre ferramentas de aço-rápido melhorou suas propriedades, ampliando sua aplicação.

O processo convencional de fabricação do aço-rápido envolve etapas de fundição, lingotamento, recozimento e homogeneização, forjamento, laminação, recozimento final, têmpera e revenimento [16]. Por esse processo, segregações na composição acabam reduzindo a vida das ferramentas. O processo de fabricação por metalurgia do pó é uma alternativa que

confere uma granulometria mais fina e maior homogeneidade de estrutura, o que se traduz em propriedades melhoradas dos aços-rápidos sinterizados.

2.5.2 Metal-duro

O metal-duro foi desenvolvido em Leipzig no ano de 1926 [16] e tornou-se o material de ferramenta de usinagem mais empregado na indústria. Sua versatilidade de composição, grande resistência à compressão e sua dureza a quente muito superior a do aço-rápido contribuíram para sua ampla difusão nas mais diversas aplicações. É produzido por metalurgia do pó e tem como base o carboneto de tungstênio (WC) e o cobalto (Co). A adição de outros carbonetos como elementos de liga (TiC, (Ta, Nb)C e VC, por exemplo) foi necessária para estender sua aplicação para além do ferro fundido [8]. Os carbonetos fornecem dureza a quente e resistência ao desgaste, enquanto o ligante metálico, geralmente o Co, atua na ligação dos carbonetos frágeis, conferindo tenacidade. Diferentes proporções entre ligante e carbonetos permitem ajustar as propriedades, como resistência ao desgaste e tenacidade, conforme a aplicação. Essas variantes de composição deram origem à classificação ISO 513. Originalmente a norma contemplava os grupos P (aços em geral), M (aços inoxidáveis) e K (Ferros Fundidos) [16], mas atualmente incorpora também os grupos N (não-ferrosos), S (Superligas resistentes ao calor) e H (materiais endurecidos). Cada grupo é subdividido por uma numeração de 1 a 50, que indica a relação entre tenacidade e resistência ao desgaste.

Avanços recentes no processo de fabricação vêm incrementando o desempenho das ferramentas de metal-duro. O desenvolvimento de grão ultrafino (da ordem de décimos de micrometro) permite aumentar simultaneamente a resistência ao desgaste e a tenacidade [8].

2.5.3 Revestimentos de ferramentas

A deposição de finas camadas de materiais sobre as ferramentas, com propriedades diferenciadas do substrato, possibilitou incrementar suas propriedades. Diferentes processos de revestimento foram desenvolvidos, utilizando princípios físicos ou químicos. O mercado para os processos CVD (*Chemical Vapor Deposition*) e PVD (*Physical Vapor Deposition*) representa 80% dos insertos atualmente vendidos no mundo [6]. Processos químicos geralmente envolvem maiores temperaturas e produzem camadas mais espessas (da ordem de 5 a 10 μ m [16]), enquanto que os processos físicos são empregados para obter camadas menores, chegando à escala nanométrica [3]. Fixando as demais variáveis, a maior espessura

de revestimento incrementa a resistência ao desgaste à ferramenta revestida por CVD. Por outro lado, as tensões residuais geradas pelos processos CVD tendem a reduzir a tenacidade das ferramentas e aumentam o raio de arredondamento do gume, tornando a ferramenta menos afiada. Gumes menos afiados podem refletir negativamente na qualidade da peça usinada e nas forças de usinagem.

Uma grande diversidade de materiais é aplicada como revestimento de ferramentas, de acordo com a aplicação. Segue uma lista de alguns dos principais materiais atualmente empregados como revestimentos e algumas de suas propriedades [9]:

- Carboneto de Titânio (TiC) – reduz o coeficiente de atrito, o que se reflete na temperatura de usinagem, nas forças de corte e na tendência à adesão. Possui menor coeficiente de expansão térmica que o TiN, o que é vantajoso quando há oscilações térmicas;
- Nitreto de Titânio (TiN) – É quimicamente mais estável que o TiC, o que reduz os fenômenos de difusão. Apresenta excelente aderência sobre o material do substrato, sendo o revestimento mais popularmente utilizado;
- Óxido de Alumínio (Al_2O_3) – Elevada dureza à quente, estabilidade química e boas propriedades refratárias. É muito frágil e de aderência limitada, sendo normalmente aplicado sobre uma camada de TiC;
- Carbonitreto de Titânio (TiCN) – Busca aliar as vantagens do TiN e TiC descritas;
- Nitreto de Titânio e Alumínio (TiAlN) – Revestimento que vem ganhando mercado do popular TiN, por sua superior resistência ao desgaste, capacidade refratária e maior dureza à quente [18].

Variações na estruturação das camadas de revestimentos durante o processo de deposição ampliam drasticamente a versatilidade de propriedades dos mesmos. Os primeiros revestimentos eram monocamada, permitindo apenas uma característica ao longo de toda a espessura. Logo a seguir, surgiram os revestimentos multicamada, onde combinações de diferentes materiais são sobrepostas, geralmente numa espessura total que não excede $10\mu m$. Assim, podem-se introduzir camadas com funções de adesão, refratárias, resistência ao desgaste ou redução de atrito. Avanços na tecnologia de revestimentos PVD permitem atualmente reduzir a espessura de camada à escala nanométrica, o que tornou possível obter revestimentos com centenas de camadas numa espessura total de 2 a $5\mu m$ [3]. Tal conceito melhora significativamente as propriedades e a vida das ferramentas. Testes de brocas de aço-rápido em furação a seco da liga Ti6Al4V com revestimento nanocamada sólida-lubrificante (400 bicamadas MoS_2/Mo) conferiram 33% de redução de torque e nenhuma evidência de

falha no fim da vida da broca, segundo Kustas *et alli apud* Weinert *et alli* [3]. Os revestimentos multicamada apresentam descontinuidades perceptíveis de composição e propriedades ao longo de sua espessura (**Figura 2-10** à direita), mas atualmente é possível também aplicar estruturas tipo gradiente como as da **Figura 2-10** (à esquerda). Neste caso, há uma variação gradual de composição ao longo da espessura do revestimento PVD, o que procura aliar vantagens da estrutura monocamada (mais rígida) e da multicamada (mais versátil). Por fim, desenvolveram-se também estruturas nanocompostas por cristais de altíssima dureza envoltos em uma matriz amorfa, como ilustrado na **Figura 2-11**. O revestimento PVD nanocomposto da **Figura 2-11** é significativamente mais duro que os de estruturação convencional, podendo possuir altíssimo teor de alumínio em sua composição [18]. Diversos pesquisadores denominam essa nova família de revestimentos de supernitretos [3]. Testes realizados por Erkens *et alli apud* Weinert *et alli* [3] em fresamento a seco de aço 42CrMo4V com várias velocidades de corte, compararam TiAlN convencional e um supernitreto, mostrando vidas de ferramenta sempre superiores no supernitreto.

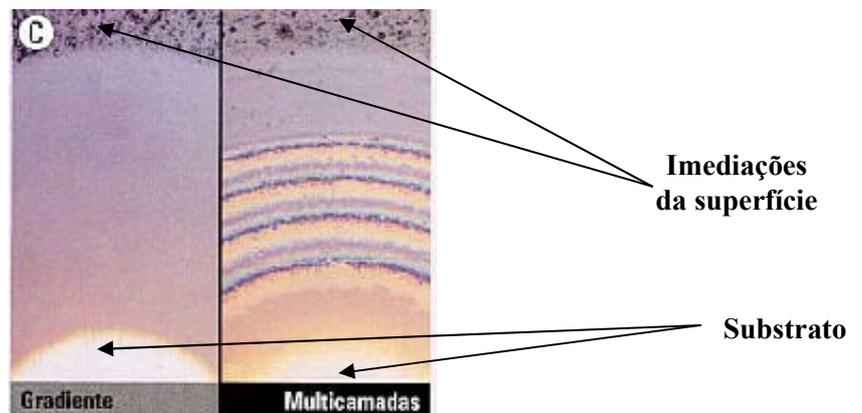


Figura 2-10 – Comparação entre revestimentos com multicamada e com gradiente [19].

Já existem versões comercialmente disponíveis de revestimentos nanocamada e supernitretos. Os fornos com tecnologia LARC[®] (*Lateral Rotating Arc Cathodes*) permitem, além do controle nanométrico, regular de maneira precisa a vaporização dos componentes do revestimento, gerando gradientes de composição na parte inferior e superior deste. Com isso, é possível obter teores muito altos de qualquer um dos elementos componentes em uma determinada porção do revestimento [19]. Também é possível obter camadas uniformes de décimos de micrometro de espessura e extremamente lisas. A **Tabela 2-1** compara propriedades de revestimentos convencionais e nanocompostos de um prestador de serviço de revestimento com fornos LARC[®] no Brasil.

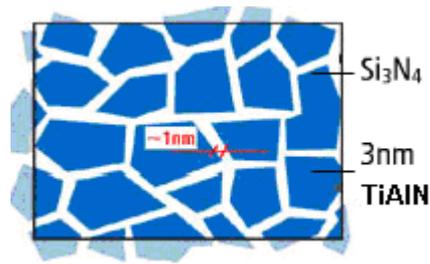


Figura 2-11 – Estruturação nanocomposta dos cristais de TiAlN em matriz amorfa de Si₃N₄ - revestimento comercial nACo®[19].

Tabela 2-1 - Propriedades de alguns revestimentos comerciais [20].

Designação	Composição	Dureza (HV)	Espessura	Configuração	Coefficiente de atrito
AlboNiT®	Carbonitreto de Titânio Alumínio (TiAlCN)	2600	1 a 4µm	Gradiente	0,25
nACro®	(nc-AlCrN)/(a-Si ₃ N ₄)	4000	1 a 7µm	Nanocomposto	0,35
nACo®	(nc-TiAlN)/(a-Si ₃ N ₄)	4300	1 a 4µm	Nanocomposto	0,45

2.6. FURAÇÃO COM FERRAMENTAS DE CORTE DE GEOMETRIA DEFINIDA

O material removido na obtenção do furo é convertido em cavaco pela rotação relativa da ferramenta e da peça, aliado a um movimento de avanço no sentido do eixo de rotação, seguindo uma trajetória retilínea. Em outras palavras, é um processo de usinagem onde o movimento de corte da ferramenta é rotativo, e o movimento de avanço é na direção do eixo [21]. A **Figura 2-12** ilustra os movimentos de corte e avanço de uma broca, bem como o movimento resultante.

A furação é o processo mais barato para obtenção de furos cilíndricos ou cônicos na maior parte dos componentes fabricados [22]. Por volta do ano 1800, surgiram as primeiras publicações sobre furação de metais e em 1820 surgem as brocas helicoidais, que se tornaram as ferramentas mais fabricadas e difundidas para usinagem na atualidade [6]. Existem mais de uma centena de afiações diferentes e diversos perfis específicos para brocas helicoidais empregadas tanto para furos rasos como profundos, em cheio ou com pré-furo. Além das brocas helicoidais, existem também outros tipos de brocas: chatas, de centro, de trepanação, canhão, BTA, Ejector, ou de canais retos. A **Figura 2-13** mostra as principais partes constituintes de brocas helicoidais com haste cilíndrica ou cônica. As normas NBR 6176 e DIN 1412 tratam em maiores detalhes a classificação e terminologia das brocas.

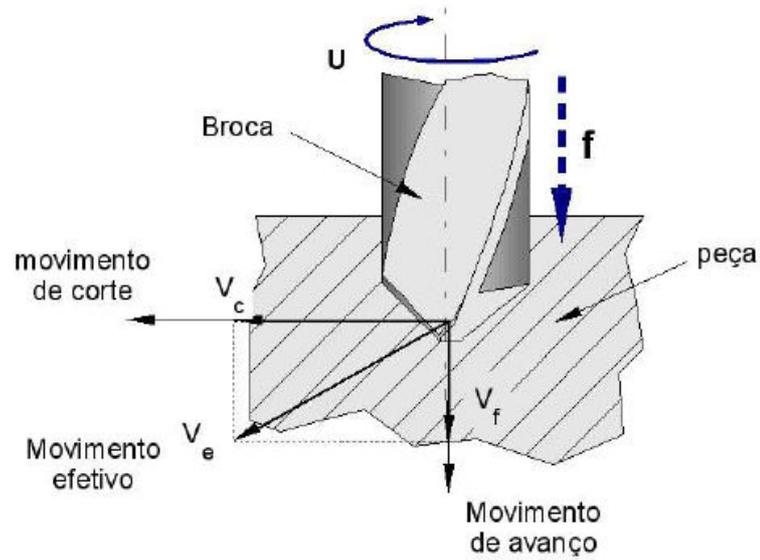


Figura 2-12 – Movimentos no processo de furação com ferramentas de corte de geometria definida [21].

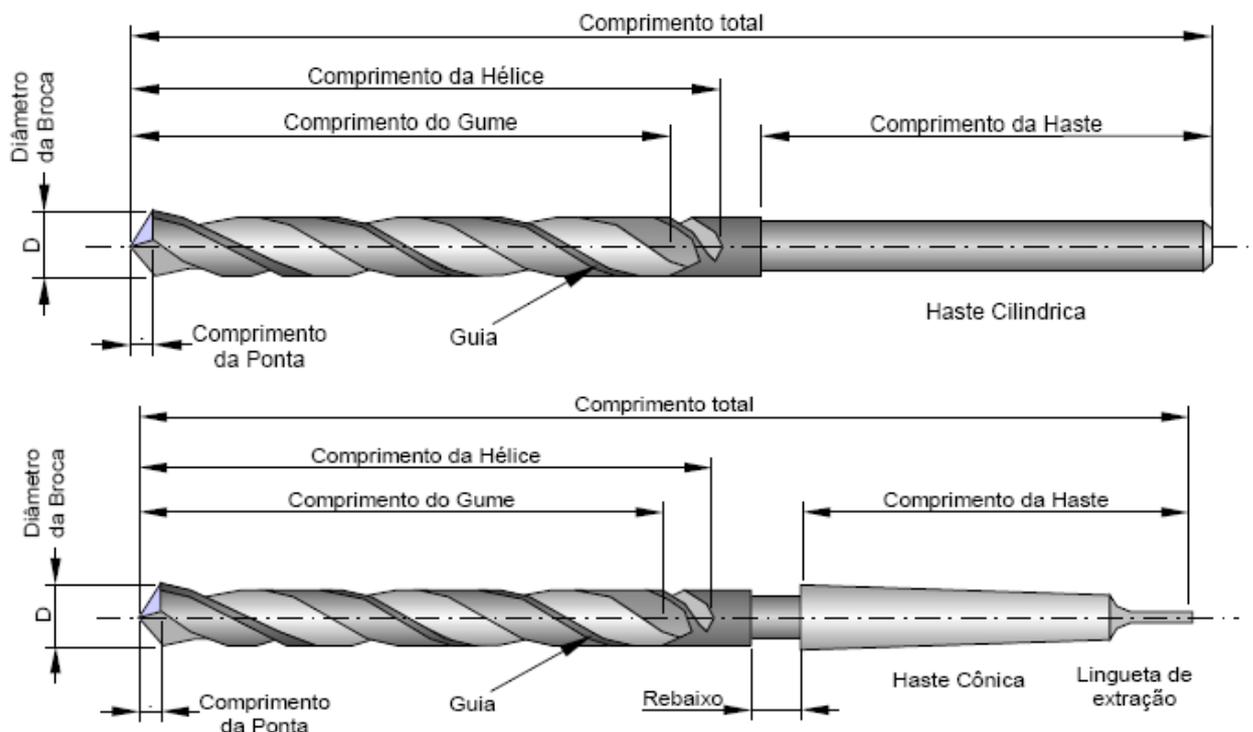


Figura 2-13 – Principais partes constituintes de uma broca helicoidal com haste cônica ou cilíndrica [21].

2.6.1 Furação com brocas helicoidais

A **Figura 2-14** mostra alguns elementos geométricos importantes vistos de topo em uma broca helicoidal. Cada gume principal é um elemento cortante que aponta no sentido de corte. O gume transversal une os gumes principais e situa-se na ponta da broca [23]. Segundo König *apud* de Andrade [24], o gume transversal tem como função estrudar material na direção do gume principal. Porém, nas geometrias convencionais, os ângulos de saída são muito negativos e a velocidade de corte é sempre baixa, ocasionando baixa eficiência de corte. O gume transversal é responsável por cerca de 60% a 70% da força de avanço [6]. Na intersecção dos gumes principais com os gumes secundários encontram-se as quinas, sendo pontos frágeis que sofrem desgaste acentuado se não receberem algum tipo de proteção: *honing* ou raio de arredondamento [6]. A velocidade de corte varia de zero, no centro, até seu valor máximo na quina da broca helicoidal. Os gumes secundários, por sua vez, estão na periferia das guias, que conferem estabilidade dimensional ao furo usinado pelo direcionamento da broca [21]. König *apud* de Andrade [24] afirma que há significativo atrito das guias com a parede do furo. O transporte e a extração dos cavacos se limitam ao espaço disponível no interior dos canais da broca, o que pode dificultar sua remoção. Maiores canais geralmente implicam em redução do material na parte central da broca denominado núcleo, cuja função é garantir rigidez à broca. Segundo [21], a forma e o ângulo de hélice (**Figura 2-15**) da broca definem o ângulo de saída dos cavacos, que não é constante ao longo do gume principal.

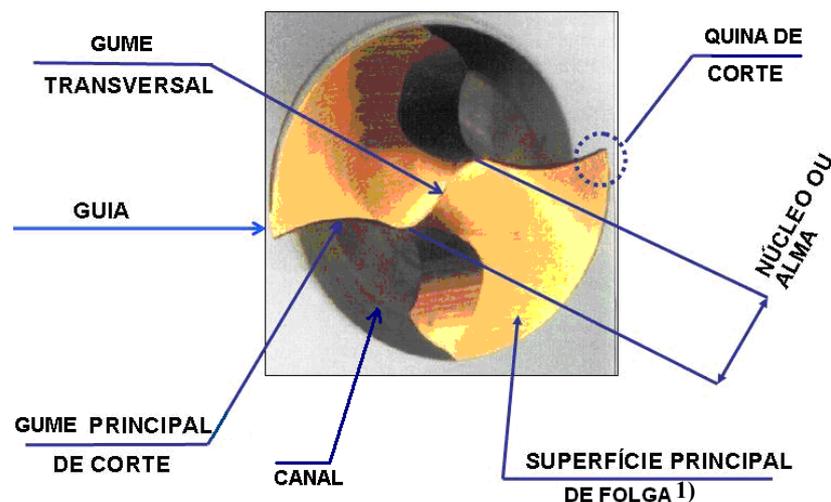


Figura 2-14 – Elementos geométricos do topo de uma broca helicoidal [6].

1) Flanco Principal



Figura 2-15 – Outros elementos geométricos de uma broca helicoidal [6].

As forças de furação podem ser decompostas basicamente em três componentes: a força de corte, normal ao gume na direção do movimento de corte; a força de avanço, na direção homônima; e a força passiva, cujas componentes de cada gume praticamente se anulam [24]. Os módulos das forças de corte e avanço dependem essencialmente do diâmetro da broca, do avanço e do material da peça, com influências de menor magnitude do ângulo de ponta, ângulo de hélice, qualidade de afiação e fluido de corte empregado [21]. Em complemento, Carosella [6] ressalta a importância da geometria da ferramenta, especialmente do gume transversal como fator influente nas forças. O momento torçor é outra grandeza importante na avaliação dos esforços em brocas [24].

A evolução na geometria das brocas helicoidais ocorreu primordialmente através da concepção de geometrias de ponta que apresentam melhor desempenho em relação à geometria original, da introdução de canais internos para injeção de fluido de corte e de novas formas de hélice [22]. A **Figura 2-16** compara a geometria convencional do gume transversal com duas concepções mais modernas. Tanto na geometria tipo *Split Point*, como na forma “S”, há redução nas forças de avanço pela otimização da geometria do gume transversal. Outras afiações especiais com diferentes perfis são mencionadas na literatura [6, 21, 25].

2) Ângulo de incidência

3) Segundo flanco secundário

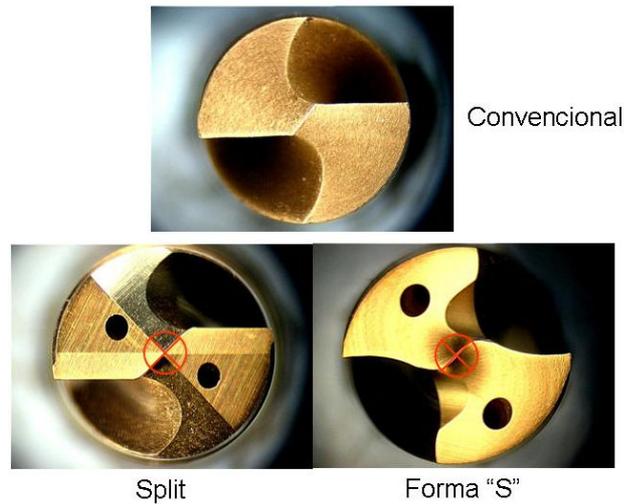


Figura 2-16 – Diferentes afiações do gume transversal de brocas [6].

2.6.2 Desgastes, avarias e critérios de fim de vida para brocas helicoidais

Pela complexidade geométrica da broca helicoidal, diversas grandezas são relacionadas ao desgaste [4, 24]. Algumas das grandezas mais utilizadas são: desgaste de flanco (VB), desgaste nas guias (H), desgaste do gume transversal, arredondamento e possível lascamento das zonas de transição (Pt e Pm, por exemplo), desgaste de cratera (Kb), desgaste de ponta, colapso catastrófico, entre outras. A **Figura 2-17** ilustra algumas dessas grandezas.

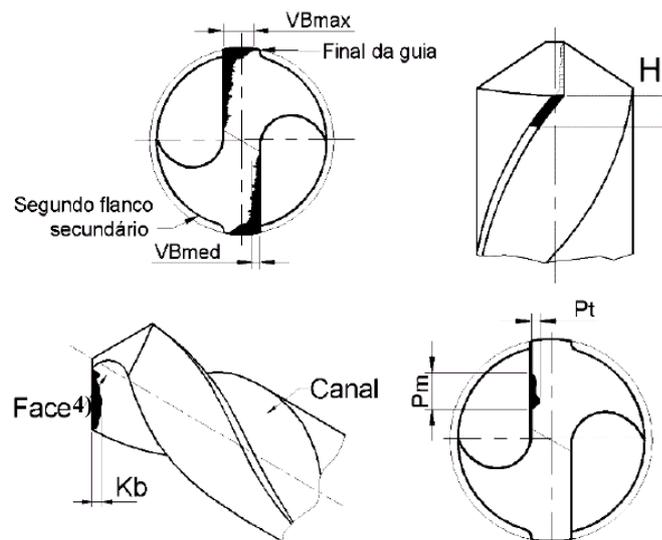


Figura 2-17 – Exemplos de grandezas de desgaste em brocas helicoidais, segundo Bork *apud* de Andrade [24].

4) Superfície de saída

O fim de vida de brocas helicoidais pode ser determinado por diversos critérios: qualidade da peça usinada, aumento da força de corte, da potência consumida, do torque, da força de avanço, ruídos anormais, faíscamento intenso no corte, vibrações excessivas, forma dos cavacos, acabamento fora do especificado, tolerâncias de fabricação não-conformes ou um valor limite para quaisquer grandezas de avarias ou desgastes indicadas na literatura [4, 21, 24].

2.6.3 Desenvolvimentos em brocas helicoidais para redução ou eliminação de fluidos de corte

No que se refere às ferramentas de corte, graças aos avanços recentes na tecnologia de materiais, tornou-se possível minimizar o impacto da temperatura sobre os gumes de corte em muitas situações. Tipicamente, substratos mais duros e revestimentos mais resistentes foram desenvolvidos para viabilizar o uso econômico da usinagem a seco ou em MQFC [26]. Schulte *apud* Weinert *et alli* [3] ressalta o desenvolvimento do metal-duro com grão ultrafino, da ordem de décimos de micrometro, que ampliou os campos de aplicação possíveis pela melhora de suas propriedades mecânicas. Especial avanço se tem conseguido na tecnologia de revestimentos de ferramentas, o que abre horizontes para eliminação total ou parcial do fluido de corte.

No que diz respeito à geometria de ferramentas, alguns parâmetros de projeto normalmente necessitam ser revistos. De maneira geral, procura-se reduzir a geração de calor da ferramenta com geometrias que diminuam atrito sem penalizar excessivamente a resistência. Para brocas, por exemplo, maiores canais de saída, maior conicidade inversa no diâmetro de corte, guias mais estreitas, e otimização da geometria do gume transversal podem vir a ser necessários para se obter resultados satisfatórios de vida [26]. O mesmo princípio se aplica a outros processos de usinagem.

Por fim, a própria textura de fabricação da ferramenta tem recebido especial atenção dos fornecedores que identificaram importante relação entre o desempenho da ferramenta e a qualidade de fabricação das superfícies dos canais e das guias [14].

2.7. USINAGEM DE ROSCAS INTERNAS COM FERRAMENTAS DE CORTE DE GEOMETRIA DEFINIDA

O rosqueamento pode ser definido como um processo de usinagem ou conformação, destinado à obtenção de filetes de rosca por meio da abertura de um ou mais sulcos helicoidais de passo uniforme em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução [5]. Na usinagem de roscas, a dimensão, o passo e a porcentagem da profundidade da rosca determinam a quantidade de material removido, o que tem efeito significativo na vida da ferramenta utilizada. O rosqueamento interno é realizado para obtenção de roscas fêmeas [17], empregando-se para isto diversos tipos de ferramentas: machos de corte, ferramentas de perfil único, ferramentas de perfil múltiplo, fresas, machos de conformação ou ferramentas de torno-fresamento [27]. O processo por conformação é mais indicado para materiais com boa ductilidade. Dentre as ferramentas para roscas internas, o macho de corte é o mais difundido na indústria, possibilitando excelente precisão da rosca tanto em diâmetros pequenos como grandes. Os machos de corte são, basicamente, parafusos com canais longitudinais formados para gerar múltiplas superfícies cortantes.

O processo de rosqueamento interno com machos de corte apresenta grandes dificuldades de remoção de cavacos e de lubrificação dos gumes cortantes. Além disso, por ser normalmente uma das últimas etapas do processo de fabricação, as peças são caras e exige-se cuidado para não quebrar a ferramenta e prendê-la dentro do furo [28]. Quando os furos são cegos, a extração dos cavacos à frente do macho é crítica, devendo ser direcionados para trás ou então é preciso prever um alojamento no fundo da rosca para esses cavacos. O rosqueamento interno com machos exige refinado sincronismo entre movimentos de rotação e avanço, sob pena de distorcer o perfil gerado e/ou sobrecarregar a ferramenta. Considerando a complexidade do processo, o rosqueamento é muito menos estudado que o torneamento e o fresamento, sendo a maioria das publicações voltada para machos de canais retos [28].

2.7.1 Rosqueamento interno com machos de corte

O macho de corte é uma ferramenta bastante complexa, composta por múltiplos gumes que, através do movimento rotativo combinado com o axial, executa a usinagem na superfície interna de um furo, cujo diâmetro é um pouco menor que o diâmetro externo do macho, a fim de promover remoção do material no perfil desejado. O movimento de avanço é sincronizado com o passo, eliminando a flexibilidade desse parâmetro. Após a geração da dimensão da

rosca, há uma reversão do sentido de avanço e rotação, a fim de retirar a ferramenta. A **Figura 2-18** apresenta a terminologia para as principais partes que compõem um macho de corte.

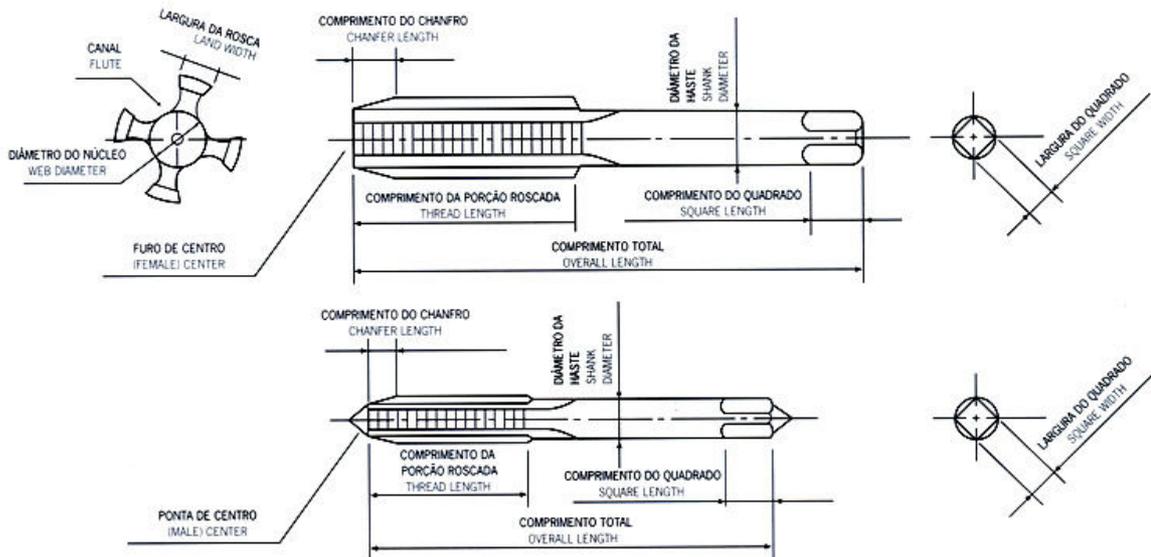


Figura 2-18 – Terminologia de machos de corte, segundo a OSG [29].

Os primeiros gumes, que estão dispostos na extremidade cônica, têm a função de remover material, juntamente com o primeiro gume da parte cilíndrica do macho. Cada cunha cortante é denominada filete. Os filetes da parte cilíndrica têm a função de calibração dimensional, sem os quais não é possível garantir tolerâncias de fabricação aceitáveis [30]. Na realidade, mesmo na parte cilíndrica é usual haver uma pequena conicidade de alívio a fim de minimizar o atrito nos filetes de calibração. A **Figura 2-19** mostra o detalhe de um macho de corte com os filetes de entrada e de calibração. A velocidade de corte nos filetes da entrada cônica é menor que na parte cilíndrica.

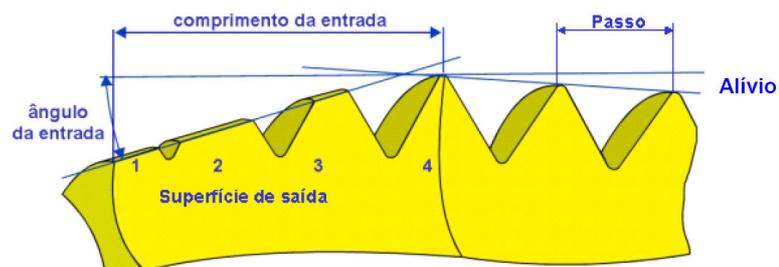


Figura 2-19 – Características da entrada de um macho de corte segundo a Titex Plus *apud* Mota [5].

Os machos de corte são classificados de acordo com sua forma de aplicação em machos manuais e machos-máquina. Os machos manuais geralmente são fornecidos em jogos com comprimentos cônicos progressivamente menores a fim de remover o material em etapas. Machos-máquina se adaptam em variados tipos de máquinas-ferramenta, como tornos, centros de usinagem e furadeiras, sendo fixados por sistemas rígidos ou flutuantes [23].

Quanto à forma dos canais, os machos de corte são produzidos com canais retos, em hélice, ou com uma combinação dos dois. Os canais existem por três razões principais: formar os gumes cortantes, proporcionar folga para saída dos cavacos, e conduzir o fluido de corte para a região de formação dos cavacos [5]. Dependendo da aplicação, pode haver dois, três ou quatro canais, sendo os machos com menos canais aplicados quando há maior dificuldade na extração dos cavacos.

Há três tipos principais de machos no mercado [29]. Machos com canais retos (à direita na **Figura 2-20**) são usados para furos cegos e passantes em materiais de cavacos curtos, permitindo que os mesmos fiquem nos canais. Machos com ponta helicoidal (à esquerda na **Figura 2-20**) são usados somente em máquinas que usinam roscas passantes em materiais de cavaco longo. Em alguns casos, podem ser usados em furos cegos, desde que se dimensione adequadamente o alojamento dos cavacos no fundo da rosca. A ponta helicoidal empurra o cavaco para frente no sentido de avanço. Essa característica facilita o fluxo do fluido de corte até a região de formação dos cavacos e permite reduzir o tamanho dos canais, reforçando os filetes. Os gumes angulares proporcionam melhor acuracidade dimensional [5]. Os machos helicoidais (centro da **Figura 2-20**) são a primeira escolha para furos cegos por direcionarem os cavacos pra trás, no sentido oposto ao avanço, removendo-os da região de corte.

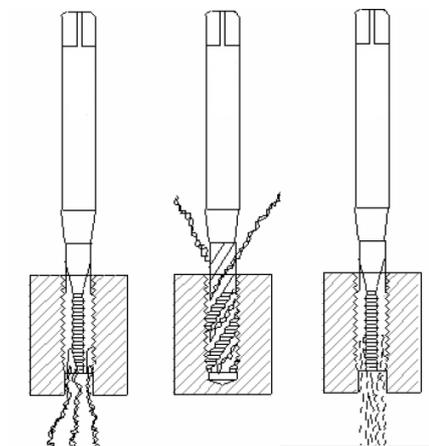


Figura 2-20 – Tipos principais de machos de corte quanto à configuração do canal [29].

O comprimento do chanfro de entrada define o número de gumes ativos no corte de material, as tensões mecânicas atuantes em cada gume e o limite de profundidade de rosca em furos cegos. Machos com chanfro longo distribuem melhor os esforços em materiais de difícil usinagem, porém com o custo de se ter uma extensa região não roscada no componente. Machos de entrada curta, por sua vez, estão sujeitos a maiores tensões por gume, que aceleram os processos de falha da ferramenta, principalmente as tensões de tração. Os ângulos de saída e de incidência são decisivos no desempenho de machos de corte. Esses ângulos variam ao longo dos filetes da entrada cônica, tornando inúmeras as possibilidades de construção geométrica da ferramenta.

2.7.2 Desgastes, avarias e critérios de fim de vida para machos de corte

Os desgastes e avarias observadas em machos de corte podem ser resumidos em quatro tipos principais ilustrados na **Figura 2-21**: desgastes ocasionados pelos mecanismos já mencionados no tópico 2.3.1 no flanco ou na superfície de saída dos gumes; o lascamento de filetes sujeitos à sobrecarga; o rasgamento, que é o arrancamento da parte superior da crista de um ou mais filetes; e a soldagem de material sobre a ferramenta, não necessariamente acompanhada de arrancamento de material [30, 31]. Pelas velocidades de corte tipicamente baixas empregadas em rosqueamento com machos, pode ocorrer soldagem de material mesmo em materiais considerados frágeis, segundo Reis [31]. Este pesquisador detectou soldagem e delaminação do revestimento em ferramentas usinando ferro fundido cinzento a 8,5m/min de velocidade de corte. A delaminação foi atribuída às trincas que se propagam até o substrato, formando lâminas de revestimento que, no retorno, raspam os cavacos retendo-os nos filetes de forma tal que estes chegam a penetrar entre as lâminas e arrancá-las.

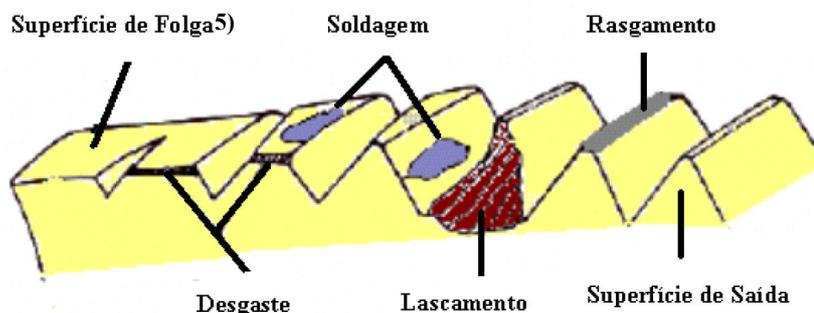


Figura 2-21 – Principais formas de desgastes e avarias em machos de corte [30]

5) Flanco

Como a maior parte do esforço concentra-se nos filetes de entrada, é nessa região que quase sempre se concentram os desgastes. À medida que o desgaste se desenvolve, o diâmetro definido pelo macho desloca-se do primeiro filete da parte cilíndrica para o segundo, e assim sucessivamente, até não ser mais possível garantir as tolerâncias da rosca. A velocidade de corte tem influência importante no mecanismo de desgaste, como já discutido no tópico 2.3.1. O colapso catastrófico do macho é um problema freqüente, devido às severas solicitações a que esse tipo de ferramenta é submetido, com vários gumes em contato simultâneo. Segundo Reiter *et alli apud* Mota [5], o torque é uma variável crítica, freqüentemente agravado pelo elevado atrito dos cavacos acumulados dentro do furo e pelas deficiências de lubrificação na interface cavaco-ferramenta. As operações anteriores de furação (e eventualmente de alargamento) também exercem significativa influência no resultado do rosqueamento [30].

A complexidade geométrica dos machos de roscar dificulta a mensuração dos desgastes e avarias neles observados, não sendo habitualmente usado nenhum dos parâmetros tradicionais de desgaste na literatura [31]. Há dificuldade de visualização dos desgastes nas superfícies através de microscópio óptico, pela restrição de foco imposta pelos diversos ângulos constituintes da ferramenta. Alternativas sofisticadas envolvem altos investimentos e tempos de análise das ferramentas [28], o que normalmente não se viabiliza em aplicações industriais. Critérios de fim de vida baseados em calibradores tipo “passa – não passa” é a alternativa econômica mais adotada pelas indústrias. Outra opção mais recente é o monitoramento de grandezas relacionadas ao desgaste, como o torque, por exemplo. Alguns sistemas permitem esse tipo de abordagem, disponibilizados no mercado por empresas como Emuge, Artis, Prometec, Brankamp e Montronix.

2.8. MEIOS AUXILIARES DE CORTE

2.8.1 Definições e funções

Teixeira [1] propõe uma classificação mais abrangente para enquadrar produtos no estado sólido e outras formas de facilitar o processo de usinagem, como a introdução de calor (usinagem a quente), a retirada de calor (usinagem criogênica) ou a introdução de excitações ultrassônicas. São os chamados meios auxiliares de corte que podem ser físicos (sólidos, líquidos, gasosos ou mistos) ou especiais (térmicos, mecânicos, químicos, revestimentos de ferramentas ou inclusões na peça). Os fluidos de corte são um caso particular dos meios

auxiliares de corte físicos, compreendendo os meios líquidos geralmente empregados na indústria para facilitar a usinagem. Os meios líquidos, por sua vez, são tradicionalmente subdivididos em:

Produtos miscíveis em água – possuem custo inicial mais baixo e excelentes propriedades refrigerantes, em função da grande participação de água em sua composição. Entretanto, eles têm vida limitada, seu gerenciamento é complexo e custoso, têm baixo poder lubrificante e podem acelerar a corrosão. Dentro deste grupo se enquadram as emulsões e as soluções aquosas. As primeiras requerem um agente emulgante que “solubiliza” o óleo-base na água, enquanto que as últimas empregam produtos orgânicos e inorgânicos não derivados de petróleo e são frequentemente denominadas de “fluidos sintéticos”. Qualquer perturbação externa ao equilíbrio químico dos componentes de uma emulsão provocará instabilidade. Exemplos de potenciais causadores de perturbação são os sais de cálcio e microorganismos que se alimentam de componentes da emulsão. As soluções aquosas são mais estáveis quimicamente, aumentado sua vida útil, porém apresentam custo mais elevado, tendem a concentrar-se em uso, geram maiores problemas de descarte, e têm forte ação detergente, tendendo a desengraxar partes das máquinas, o que exige uma relubrificação mais constante [32].

Produtos não-miscíveis em água – são constituídos de óleos graxos e óleos minerais na forma pura ou, mais frequentemente, óleos compostos misturados com aditivos [32]. Apresentam vida útil prolongada e excelente poder lubrificante em comparação com os fluidos miscíveis. Por outro lado, seu custo de aquisição é maior, são mais tóxicos aos operadores e ao meio ambiente e apresentam maior risco de explosão.

Diversos tipos de aditivos melhoram as propriedades dos elementos-base dos fluidos de corte. Existem aditivos com função anti-espumante, anti-corrosiva, detergente, emulgante, biocida e lubrificante [8]. Neste último grupo se enquadram as matérias graxas e os aditivos de extrema pressão (EP) [32]. As matérias graxas podem ser de origem animal ou vegetal e possuem excelente lubricidade em temperaturas próximas à ambiente, porém se deterioram em temperaturas mais elevadas. Conforme discutido no tópico 2.1, atrito intenso e elevação da temperatura é resultado do processo de corte, especialmente nas regiões “c” e “d” da **Figura 2-1**. Portanto, é desejável que os fluidos de corte penetrem naquelas regiões e formem filmes com baixa resistência ao cisalhamento, mas resistentes à grande pressão e temperatura. Alguns aditivos, como Enxofre, Cloro e Fósforo, são conhecidos como aditivos de extrema pressão (EP) por reagirem em temperaturas elevadas com a superfície nascente do cavaco e

promoverem melhores condições de cisalhamento. Diferentes resultados são obtidos pela sobreposição de um ou mais aditivos e pela forma como estes são inseridos na composição de qualquer um dos fluidos de corte mencionados. O enxofre, por exemplo, pode se encontrar livre no fluido de base mineral ou combinado com matérias animais ou vegetais. Convenciona-se chamar os fluidos do primeiro grupo de óleos sulfurados e nomeiam-se os fluidos do último de óleos sulfurizados [32].

As funções dos fluidos de corte podem ser resumidas em [32]:

- Refrigerar a região de corte, reduzindo a temperatura para diminuir os fenômenos de desgaste por oxidação, difusão e o amolecimento do material da ferramenta;
- Redução da dilatação (distorção) térmica da peça, a fim de facilitar a obtenção de tolerâncias apertadas;
- Evitar danos à estrutura e a introdução de tensões residuais excessivas na camada limite próximas à superfície da peça usinada (principalmente em retificação);
- Refrigerar a peça para facilitar o manuseio seguro por parte dos operadores;
- Lubrificar a região de corte para redução do atrito e gerar menos calor;
- Melhorar o acabamento de superfícies usinadas;
- Remover cavacos por arraste da região de corte e dos elementos móveis da máquina (guias e barramentos);
- Proteger as peças e máquinas contra a oxidação.

Diversos tipos de fluidos foram desenvolvidos, aplicados e aperfeiçoados segundo necessidades específicas de cada operação de usinagem.

2.8.2 Efeitos indesejados dos fluidos de corte

Segundo Machado e da Silva [11], a usinagem de certos materiais como: ferro fundido cinzento (exceto em furação profunda), magnésio, certas ligas de alumínio e alguns plásticos e resinas, praticamente não é beneficiada pelos fluidos de corte. Baseado no que foi discutido no tópico 2.3.2, operações com ferramentas cerâmicas e mesmo as de metal-duro e aço-rápido submetidas a ciclos de resfriamento e aquecimento pelo contato intermitente, geralmente apresentam maior incidência de microtrincas que antecipam a falha da ferramenta. A usinagem de materiais endurecidos acima de 30HRc, por sua vez, se beneficia do maior

aquecimento da peça gerado pela ausência de fluido de corte, facilitando a deformação plástica na região de corte [11].

O fluido de corte sempre interfere no processo de usinagem, seja poluindo o ambiente de trabalho, seja impregnando a peça ou componentes da máquina-ferramenta. Tanto o manuseio como o descarte de fluidos de corte gera perdas, que podem chegar a 30%, segundo Byrne *apud* Dias [2]. Parcelas de fluido de corte podem ser perdidas para o ar, solo e água, na forma de vapores, névoas, respingos, vazamentos nas máquinas e elementos de tratamento, no transporte de cavacos e nos resíduos para descarte.

Os respingos, vapores e névoa produzidos nas operações de usinagem podem ser transportados pelo ar e aspirados pelos operadores e funcionários situados próximos ao local de usinagem [2]. O nível de névoa presente no ar está relacionado a fatores tais como: tipo de fluido de corte utilizado, tamanho das gotículas produzidas durante a operação ou, de uma forma mais concreta, ao tipo de usinagem. A concentração de névoa no interior das instalações industriais para as operações de usinagem mais conhecidas pode variar, dependendo do tipo de operação, de 0,07 a 110mg/m³, porém valores de concentração em torno de 10 a 15mg/m³ já indicam péssimas condições do ar no local de trabalho [33]. Névoas e vapores inalados podem causar doenças respiratórias, irritações nas mucosas do nariz, garganta e olhos. Vapores são gerados, sobretudo, no contato dos fluidos com superfícies quentes e podem propagar fogo. O Greenpeace Brasil *apud* Dias [2] alerta sobre compostos voláteis organoclorados presentes nos aerossóis oriundos de atomização mecânica e condensação de vapores formados durante a usinagem. Estas substâncias possuem propriedades químico-físicas que os tornam propensos ao transporte e deposição através do ar em longas distâncias e quase sempre provocam danos ao ambiente e saúde humana em locais distantes das fontes. Acredita-se que os compostos químicos tais como os sulfonatos de benzeno de sódio tetrapropileno e o hidrogênio sulfídico baixam a resistência imunológica dos trabalhadores, facilitando o surgimento destas infecções [33]. De acordo com Lucke e Ernst *apud* Queiroz [33], o câncer é um dos inconvenientes de alto risco que pode resultar da conjugação de diversos fatores, principalmente devido à ação dos compostos químicos presentes na composição dos fluidos de corte ou em decorrência de subprodutos de reações entre o material da peça, a ferramenta e o fluido de corte.

Durante a realização da operação de usinagem existem muitas oportunidades de contato entre o fluido de corte e a pele que podem desencadear as chamadas dermatites ocupacionais (**Figura 2-22**). Dias [2] menciona que os componentes básicos dos fluidos de

corte, assim como seus aditivos, biocidas, fungicidas e também produtos de reações e impurezas, podem causar diversos tipos de doenças de pele, não somente dermatites, como também inflamações cutâneas, hiperpigmentação, alergias e outras irritações. Muitos aditivos naturais e sintéticos agregados são capazes de retirar a proteção natural de gordura da epiderme permitindo maior absorção de elementos com efeitos colaterais desconhecidos e de bactérias patogênicas comumente encontradas em fluidos de corte, tais como *Escherichia coli*, *Proteus sp*, *Salmonella sp*, *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas fluorescens*, *Alcaligenes sp.*, *Brevibacterium sp*, *Bacillus sp.* e *Staphylococcus sp* [34].



Figura 2-22 – Manchas de dermatite ocupacionais [35].

Os efeitos nocivos dos fluidos de corte podem ser estendidos para longe das imediações do ambiente de trabalho. Mesmo com um sistema eficaz de filtração e recuperação dos fluidos de corte, a sua contínua utilização gera um acúmulo de contaminação até atingir um estado que inviabiliza o seu aproveitamento, exigindo a aplicação de procedimentos legais e técnicos para o descarte de fluidos inadequados ao uso. O volume de fluidos de corte que necessita de reciclagem e/ou descarte adequado traz consigo um risco potencial ao homem e ao meio ambiente. A possibilidade de acidente é proporcional ao volume produzido e as conseqüências de um manuseio inadequado são imprevisíveis para o solo, lençóis freáticos e redes de coleta de esgoto [2]. O governo dos Estados Unidos recomenda o controle de várias substâncias frequentemente utilizadas nos fluidos de corte, pois em geral eles estão associados aos danos causados à saúde do homem e aos efeitos nocivos contra o meio ambiente [33]. A constante evolução tecnológica nessa área faz com que uma grande quantidade de novos produtos sintéticos seja lançada no mercado sem testes toxicológicos adequados. Como é complexa a tarefa de monitorá-los, os órgãos ambientais americanos recomendam atitudes preventivas. No Brasil não existe uma legislação específica que determine que os fluidos de corte ou seus resíduos sejam perigosos [33]. O procedimento preventivo recomendável seria seguir as mesmas instruções dos órgãos internacionais.

2.8.3 Formas tradicionais de aplicação de fluidos de corte

A aplicação do fluido de corte por jato de baixa pressão é a técnica tradicional usada nas indústrias. Direciona-se um ou mais jatos de fluido em direção a região de usinagem, geralmente na Direção A da **Figura 2-23** (chamada “sobre cabeça”). Há também as direções alternativas B (na superfície de saída da ferramenta) e C (pelo flanco).

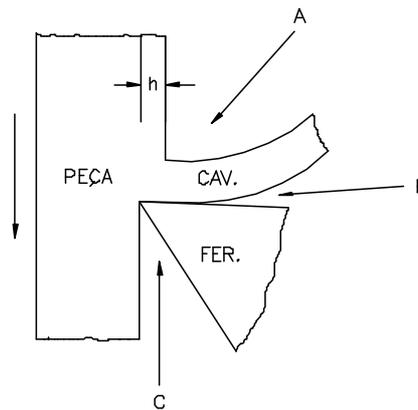


Figura 2-23 – Direções possíveis de aplicação de fluidos de corte [8].

A alimentação por jato externo apresenta sérias restrições de acesso à região de corte nos processos de furação e rosqueamento, exceto se a profundidade de corte for pequena. Uma alternativa empregada com frequência é a introdução do fluido de corte sob pressão por dentro da ferramenta até a extremidade da mesma, como ilustra a **Figura 2-24**, assegurando assim uma maior eficiência de lubrificação e refrigeração.

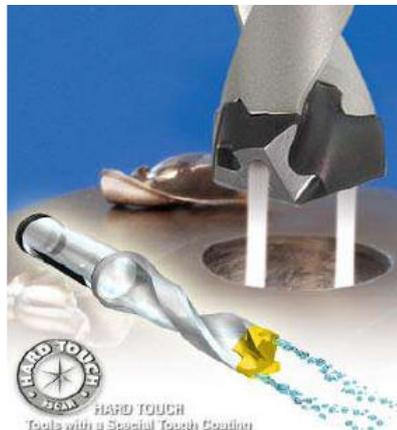


Figura 2-24 – Broca com refrigeração por jato interno [36].

2.8.4 Usinagem a seco

Com base no que foi discutido no tópico 2.8.2, é fácil perceber que a completa eliminação dos fluidos de corte é a situação ideal do ponto de vista ambiental e de saúde ocupacional. Existem vários estudos na literatura para aplicação de usinagem sem a presença de fluido de corte (também chamada de usinagem a seco ou *dry-machining* em inglês). Diferentes processos de usinagem foram abordados, como alargamento [37], fresamento de aços de médio carbono [39] e de ligas aeronáuticas [38], ou o torneamento [40, 41]. São comuns também as aplicações industriais no Brasil e no exterior, tradicionalmente operações de fresamento ou usinagem em Ferro Fundido. Por definição, a usinagem a seco não pressupõe vácuo, ou seja, há presença de ar em torno do processo de usinagem.

Também já foi discutido que a remoção de calor e o arraste dos cavacos são afetados drasticamente pela ação do fluido de corte. Quando a eliminação do fluido é total, ou mesmo em uma redução significativa da quantidade, vários aspectos do processo necessitam ser revistos, a fim de compensar efeitos negativos ao desempenho do mesmo. Shefelbine e Dornfeld [42] mencionam a menor acuracidade dimensional, a formação de maiores rebarbas e eventual piora na qualidade superficial como algumas dessas conseqüências. Kammemeier [14] comenta que, por um lado, as exigências térmicas sobre as ferramentas aumentam e as geometrias de corte precisam ser revistas especialmente para facilitar a extração dos cavacos em usinagens internas, mas que, por outro lado, o amolecimento do material cortado reduz o desgaste abrasivo, aumenta a transferência de calor para o cavaco e permite maiores taxas de avanço pela redução da espessura do cavaco.

2.8.5 Aplicação de fluidos de corte em mínimas quantidades

Apesar das pressões pela eliminação dos fluidos de corte, em muitas situações não é economicamente ou tecnicamente possível eliminá-los, como exemplifica a **Figura 2-25**. Surgiram então concepções de aplicação de fluidos em quantidades reduzidas, ou que, em último caso, ao menos prolonguem a durabilidade destes quando a redução não é possível. A Federação Alemã de Instituições para Seguridade e Prevenção de Acidentes – HVBG - lançou a normativa BGI 718 [43] com as seguintes definições:

Aplicações de ferramentas com geometria definida onde a vazão de fluido de corte foi reduzida a menos de dois litros por hora de processamento são identificadas pelo termo: Quantidade Reduzida de Lubrificação (do inglês *Reduced Quantity Lubrication* - RQL).

Quando em média não mais que 50ml/h de lubrificante são usados por hora e por ferramenta para o processo de usinagem define-se então a Mínima Quantidade de Lubrificação (do inglês *Minimal Quantity Lubrication*). Também se aceitam até 150ml/h para intervalos curtos em algumas operações com ferramentas de diâmetro superior a 40mm.

A própria Federação não cunhou o termo e reconhece que estas não são definições universais. O *Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie – IPT – Aachen* apud Markus [40] adota definições semelhantes ao descrito acima, porém este autor prefere os termos: Quantidade Reduzida de Fluido de Corte (QRFC) e Quantidade Mínima de Fluido de Corte (QMFC). Na **Tabela 2-2**, Kardekar [44] tenta resumir o histórico das principais terminologias correntes internacionalmente. Outros termos não mencionados por ele são: em português, Mínimas Quantidades de Fluido - MQF [4, 11] ou Mínimas Quantidades de Fluidos de Corte – MQFC [1, 45]; em inglês, *Minimal Quantity Cooling Lubrication* – MQCL [3]; e no alemão, *Minimalmengen Kühlschmierung* - MMKS [35] ou simplesmente *Minimalmengenschmierung* (MMS). Doravante essa técnica será referenciada simplesmente como MQFC neste trabalho.

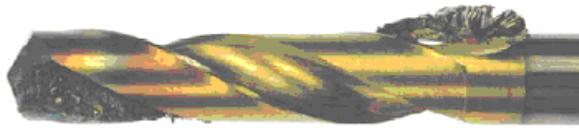


Figura 2-25 – Broca utilizada na furação a seco com um canal obstruído pela soldagem de cavacos [4].

Tabela 2-2 – Alguns termos comumente usados para MQFC [44].

Termo	Autor	Ano
<i>Spray Cooling</i>	Um <i>et alli</i>	1995
<i>Extremely low lubricant volumes</i>	Machado <i>et alli</i>	1997
<i>Minimal Quantity Lubrication</i>	Rahman <i>et alli</i>	2001
<i>Micro-Lubrication</i> ou <i>Mili-Lubrication</i>	Gressel	2001
<i>Near Dry Machining</i>	MaCabe <i>et alli</i>	2001
<i>Mist Lubrication</i>	Kelly e Cotterell	2002
<i>Eco-Lubrication</i>	Cornu	2002
<i>Minimal Fluid Application</i>	Varadarajan <i>et alli</i>	2002
<i>Minimal Volume Lubrication</i>	Marksberry	2004
<i>Green Machining</i>	Marksberry	2004

Em MQFC, o fluido de corte é usualmente arrastado em pequenas partículas por meio de ar comprimido até a região de corte. Portanto, a capacidade de refrigeração e de arraste dos cavacos em MQFC é tão baixa que pode ser considerada similar a da usinagem a seco [4]. Valem, assim, as mesmas adequações tecnológicas relacionadas no tópico 2.8.4. Além disso, como o fluido não é mais homogêneo, a eficiência do transporte do *spray* até a operação é crítica [3, 26], sendo afetada por fenômenos de turbulência, inércia das partículas e sua tendência em aderir às superfícies no percurso. Diferentes concepções de equipamento para fornecimento de MQFC aparecem na literatura, conforme a **Figura 2-26**, porém as mais difundidas são as duas primeiras [3, 26].

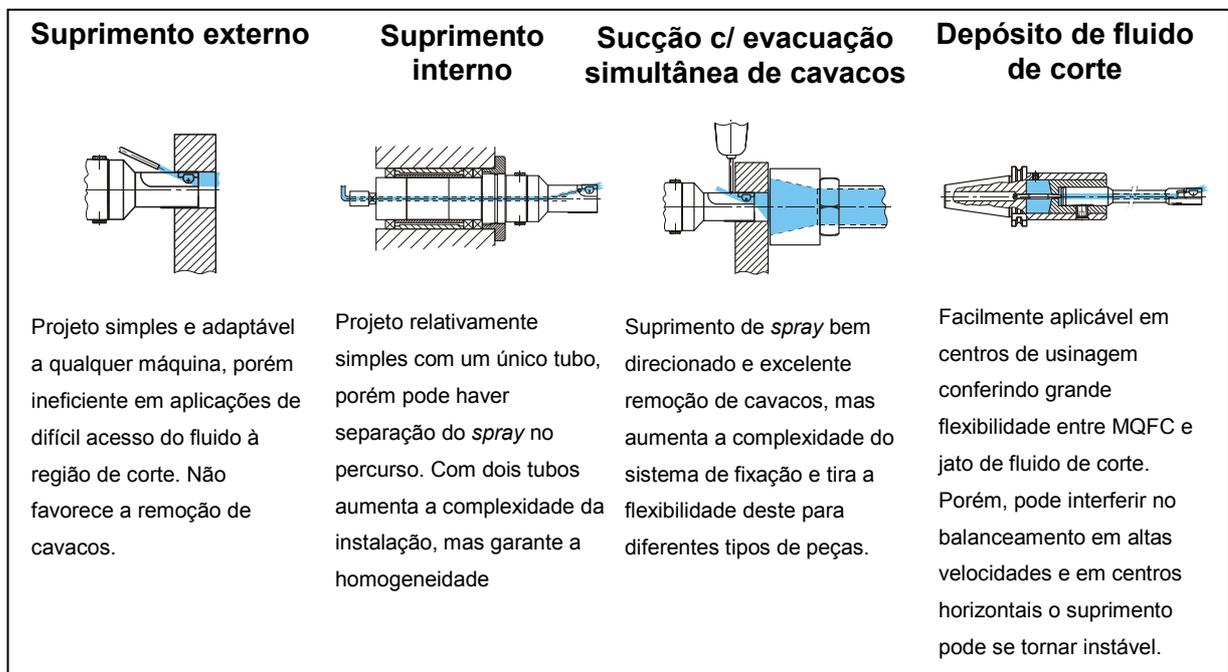


Figura 2-26 – Possibilidades de fornecimento da mistura ar-líquido em MQFC [46].

Nos sistemas de suprimento externo (à esquerda da **Figura 2-26**), o ar comprimido e o fluido de MQFC são geralmente conduzidos até o bico que possui um *venturi* calibrado em tubulações separadas, quase sempre coaxiais. O fluido de corte é então atomizado e acelerado pelo fluxo de ar contra a região de corte. Nessa concepção, é essencial que os bicos sejam posicionados próximos à região de corte e na direção adequada para assegurar que a maior parte das partículas do fluido chegue à região de interesse. O posicionamento das válvulas de comando para fornecimento da névoa tem papel importante no tempo de resposta do sistema e na minimização dos desperdícios [35].

Lopez *et alli apud* Li [47] estudaram os efeitos do fluido de corte no desgaste de ferramentas em fresamento de alta velocidade. Os autores concluíram que a posição dos bicos em relação à direção de avanço foi muito importante para otimização da penetração de MQFC. Kardekar [44] verificou relação entre rugosidade e quantidade de bicos de MQFC para a liga de alumínio A380, mostrando que a adoção de três bicos contra apenas um, reduziu a média e a dispersão dos valores de rugosidade. Como a rugosidade de processo em usinagem de alumínio está fortemente relacionada às condições de lubrificação, pode-se afirmar que o trabalho de Kardekar reforça a tese da importância no direcionamento dos bicos para a penetração de MQFC. Zeilmann [4] cita a recomendação da empresa Lubrimat em termos de distância (em milímetros) e ângulo de posicionamento dos bicos para maximizar o desempenho em furação (**Figura 2-27**).

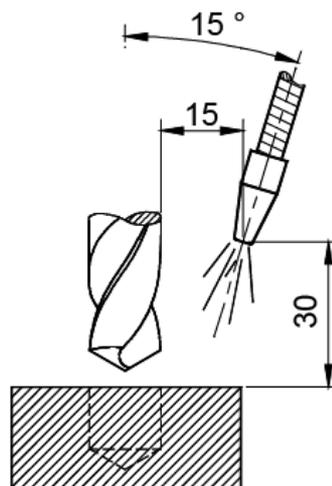


Figura 2-27 – Recomendação da Lubrimat *apud* Zeilmann para o posicionamento do bico externo à broca [4].

A **Figura 2-28** mostra os componentes de uma concepção de bico onde há um anel giratório (anel turbilhonador), que tem por função provocar uma rotação no fluxo de ar e assim contribuir para a diminuição da pressão e melhora da eficiência do *venturi*. O tamanho das gotículas atinge tipicamente entre 15 e 40 μ m. Nessa concepção, é essencial que os bicos sejam posicionados próximos à região de corte e na direção adequada para assegurar que a maior parte das partículas do fluido chegue à região de interesse. Não são adequados para operações onde o acesso do fluido de corte é dificultado, como furação, rosqueamento e mandrilamento profundo.

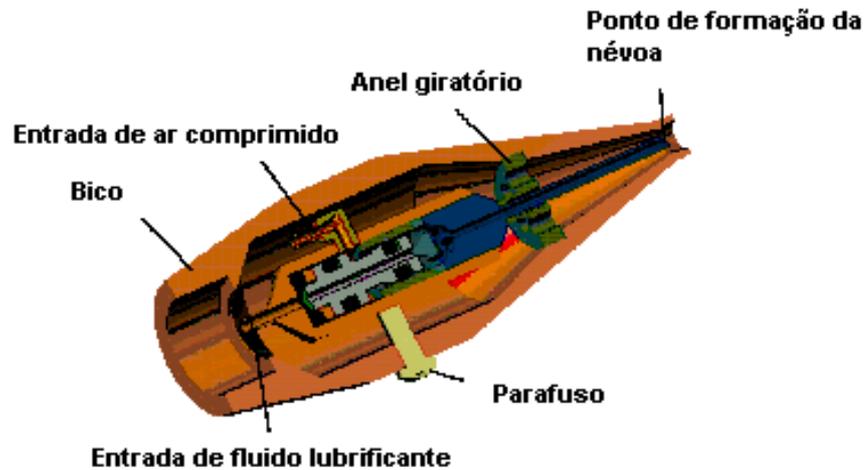


Figura 2-28 – Corte de um bico atomizador para MQFC externa [35].

Além da concepção com tanque pressurizado e bicos com *venturi*, duas outras concepções de MQFC externa são comercialmente adotadas segundo a normativa BGI 718 [43]: a primeira emprega micro-bombas pneumáticas que dosam o lubrificante conforme uma frequência ajustada (**Figura 2-29**). A fonte cita como principal vantagem a boa acuracidade de ajuste de vazão, porém destaca seu elevado custo de manutenção. O segundo tipo é usado para ferramentas de diâmetro muito pequeno, onde a elevada rotação dificulta o acesso de partículas leves de fluido. Uma válvula de alta velocidade arremessa com precisão uma única gota não atomizada de fluido em intervalos regulares até a ponta da ferramenta numa distância de até 800mm (**Figura 2-30**).

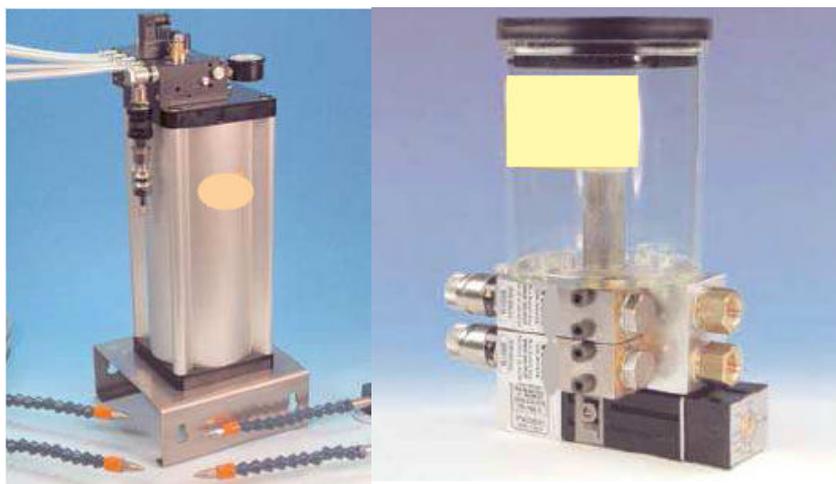


Figura 2-29 – Sistema com tanque pressurizado e *venturi* (esquerda) e sistema com micro-bombas pneumáticas (direita) [43].

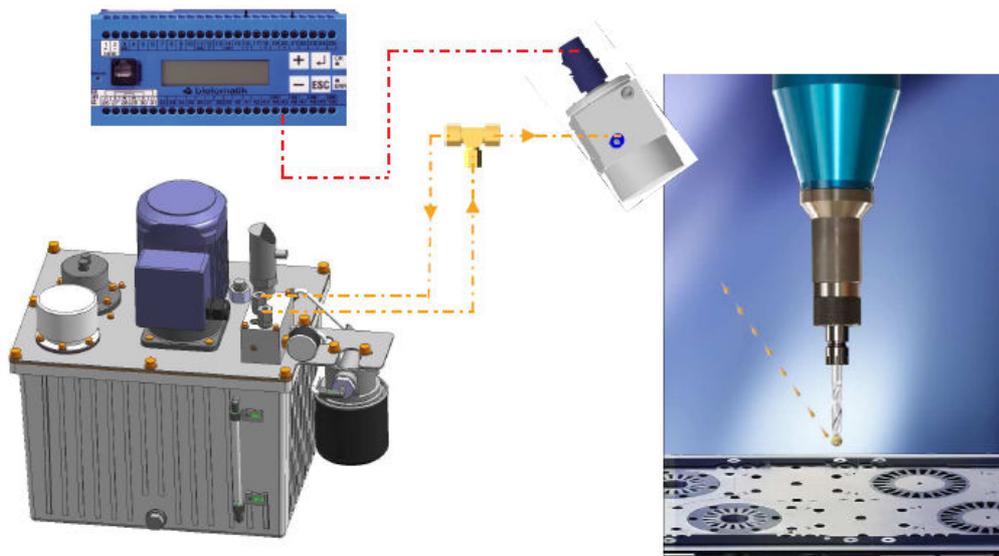


Figura 2-30 – MQFC externa sem atomização para ferramentas de pequeno diâmetro [43].

Em equipamentos de MQFC interna (**Figura 2-31**) a mistura normalmente é realizada num recipiente separado e conduzido por dutos até a extremidade da ferramenta. Produzem-se partículas de óleo com tamanhos entre 0,3 a $1\mu\text{m}$ de diâmetro. As partículas maiores dos equipamentos externos (tipicamente entre 15 e $40\mu\text{m}$) tendem a separar-se do ar nas mudanças de direção onde ocorrem turbulências. Para aplicações otimizadas, os geradores de *spray* de fluido de corte foram aperfeiçoados com controle digital integrado ao comando da máquina CNC, permitindo rápida adequação de diversos parâmetros, como pressão de alimentação, vazão e abertura do *venturi* para cada tipo de componente.

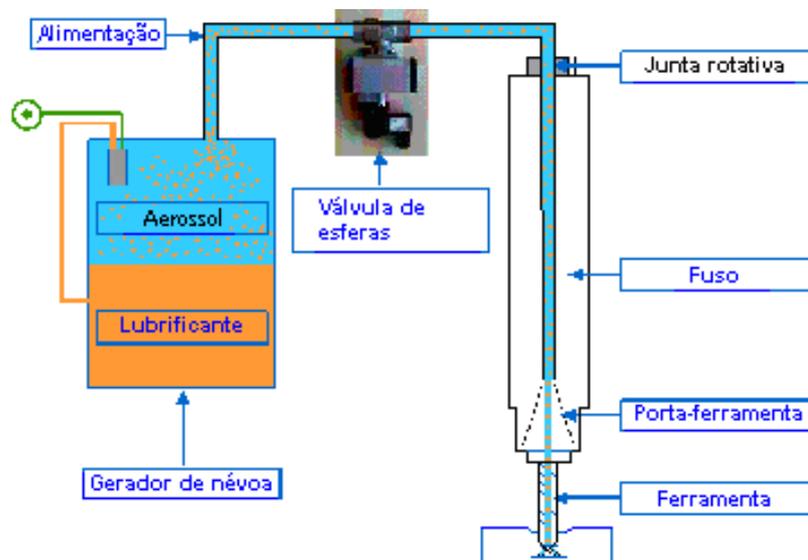


Figura 2-31 – Esquema de um equipamento de MQFC interna [26].

Devem-se evitar mudanças bruscas de direção no eixo-árvore da máquina-ferramenta e grandes variações na seção transversal da tubulação para minimizar turbulências no fluxo da mistura ar-líquido. Essas turbulências contribuem para a separação da parcela líquida, que pode se depositar no interior da máquina-ferramenta. Os parâmetros de corte aplicados em MQFC são usualmente aumentados em relação ao utilizado com jato de fluido de corte. A estratégia aproveita-se da menor espessura dos cavacos e com isso reduz o tempo de contato entre ferramenta e peça, aumentando a proporção de calor transferida para os cavacos.

Embora a quantidade de névoa produzida no ambiente de trabalho tenda a ser menor nos sistemas com MQFC que no jato de fluido de corte [48], nem por isso deve ser negligenciada. Assim, é comum instalar um sistema para exaustão de névoa na máquina-ferramenta que se adeqüe ao tamanho de partículas produzidas na atomização do fluido de corte.

2.8.6 Fluidos de corte para MQFC

A normativa BGI 718 [43] estabelece algumas recomendações na escolha de um fluido de corte para MQFC:

- Lubrificantes de baixa emissão - são assim classificados pela normativa os lubrificantes que possuem viscosidade maior que $10\text{mm}^2/\text{s}$ a 40°C , ponto de fulgor maior que 150°C e perda por evaporação até 250°C menor que 65%.
- Odor – a atomização pode intensificar o odor do fluido, razão pela qual este quesito não é irrelevante;
- *Sprayability* – deve produzir um aerossol estável e sem grande esforço energético;
- *Additivity* – permitir ajuste de formulação para materiais de difícil usinabilidade;
- Faixa de viscosidade – 15 a $50\text{mm}^2/\text{s}$ e até $100\text{mm}^2/\text{s}$ em alguns casos (a 40°C);
- Proteção anti-corrosiva – na peça e nas partes da máquina atingidas.

Alguns fluidos são particularmente considerados **inadequados**:

- Óleos naturais e graxas – aderem às partes de máquinas e oxidam facilmente;
- Emulsões e soluções de base água – contêm biocidas que podem ser atomizados e inalados no ambiente;
- Lubrificantes com *organic chlorine* e com zinco – pelas elevadas temperaturas envolvidas em MQFC subprodutos tóxicos podem ser gerados;

- Produtos a base de óleo mineral com alto teor de aromáticos (> 3ppm) pelo potencial cancerígeno.

Características como biodegradabilidade, estabilidade à oxidação e estabilidade de estocagem são mais importantes em MQFC, pois o consumo é muito menor que na aplicação tradicional. Os lubrificantes biodegradáveis tendem a aderir às superfícies interiores e exteriores das máquinas, formando filmes finos que oxidam mais facilmente (SUDA *et alli apud* WEINERT *et alli* [3]).

Pela sua biodegradabilidade, óleos de base vegetal foram usados para aplicações de MQFC. Além deles, ésteres sintéticos (óleos vegetais quimicamente modificados) possuem uma ampla gama de biodegradabilidade dependendo de sua combinação molecular de ácidos e álcoois. Mono-ésteres, di-ésteres e poliol-ésteres são considerados biodegradáveis [3]. Estes últimos possuem viscosidades mais adequadas a MQFC e por isso foram estudados (SUDA *et alli apud* WEINERT *et alli* [3]). Um teste envolvendo três poliol-ésteres com respectivas viscosidades de 19, 25 e 48mm²/s a 40°C contra um óleo base vegetal com viscosidade 36mm²/s procurou mensurar os níveis de oxidação pelo aumento do peso molecular após 168 horas de exposição de filmes desses óleos numa atmosfera à 70°C. O óleo vegetal aumentou seu peso em 65%. Em contrapartida, houve aumento insignificante no peso dos óleos de base éster. Em princípio, considera-se que um aumento superior a 10% já é indesejado [3]. Em concordância, os referidos pesquisadores defendem a superioridade dos poliol-ésteres em relação aos fluidos vegetais para MQFC.

Além dos ésteres sintéticos, os *fatty alcohols* são os fluidos mais comumente usados para MQFC. A seleção depende do tipo de alimentação, do material envolvido, da operação de usinagem e das subseqüentes operações de acabamento requeridas [3, 43]. No mesmo nível de viscosidade, *fatty alcohols* têm ponto de fulgor mais baixo que os ésteres sintéticos. Mesmo tendo um efeito refrigerante maior que o dos ésteres, ele ainda é bastante pequeno, e o fluido evapora rapidamente. São usados em operações onde se deseja manter as superfícies mais limpas de resíduos e onde há menores necessidades de lubrificação do que a obtida com ésteres. Operações que requeiram maior lubrificação normalmente utilizam ésteres sintéticos (exemplos são operações de furação, mandrilamento fino e rosqueamento em aços e ligas de alumínio). Além disso, ésteres sintéticos tipicamente são classificados como de baixa toxicidade nas legislações internacionais de fluidos.

2.8.7 Viabilidade da usinagem a seco ou com MQFC

A literatura possui diversos trabalhos sobre aplicações de MQFC onde sua utilização é bastante promissora para vários processos de usinagem, tanto no aspecto econômico, como em quesitos técnicos. Entre os aspectos técnicos, pode-se citar como vantagens, o aumento da vida da ferramenta e a diminuição dos tempos de produção.

Weinert [49] realizou ensaios com usinagem a seco e com MQFC em operações de torneamento, fresamento, furação convencional e profunda, alargamento e fresamento interpolado de roscas, principalmente em aços e ligas de alumínio, onde encontrou vários resultados de aplicação promissora. Um resumo dessas aplicações por ele identificadas se encontra na **Tabela 2-3**. Obikawa *et alli* [50] citam várias aplicações de MQFC e estudaram especificamente a aplicação de MQFC em usinagem de ranhuras em um aço equivalente ao ABNT 1045, com altas velocidades de corte, obtendo melhores resultados de vida de ferramenta com MQFC do que na usinagem a seco e com fluido de corte aplicado na forma de jato.

Tabela 2-3 – Nichos de aplicação de MQFC [3].

Material	Alumínio		Aço		F. Fundido
	Ligas fundidas	Ligas trabalhadas	Aço para rolamento (alta liga)	Para corte livre, aços temperados e revenidos	
Furação	MQFC	MQFC	MQFC	MQFC; seco	MQFC; seco
Alargamento	MQFC	MQFC	MQFC	MQFC	MQFC
Rosqueamento (corte)	MQFC	MQFC	MQFC	MQFC	MQFC
Rosqueamento (laminação)	MQFC	MQFC	MQFC	MQFC	MQFC
Furação profunda	MQFC	MQFC	-	MQFC	MQFC
Fresamento	MQFC; seco	MQFC	Seco	seco	seco
Torneamento	MQFC; seco	MQFC; seco	Seco	seco	seco
Fresamento de engrenagens	-	-	Seco	seco	seco
Corte com serra	MQFC	MQFC	MQFC	MQFC	MQFC
Brochamento	-	-	MQFC	seco	seco

Em furação, Klocke e Eisenblätter [51] avaliaram sistemas de alimentação externa e interna e obtiveram bons resultados de acabamento e vida da ferramenta para a alimentação interna. Por sua vez, Heinemann *et alli* [52] avaliaram a furação com brocas de aço-rápido de diâmetro 1,5 mm em peças de aço 1045 com profundidades de 5mm, testando diferentes

fluidos em MQFC (éster sintético e uma solução sintética com 40% de água) e comparando também com a usinagem a seco. Mesmo com as deficiências de MQFC externa nessa profundidade de corte, o pesquisador obteve menores valores de torque e maiores vidas com MQFC do que a seco na maioria dos ensaios. Zeilmann [4] aplicou MQFC em furação de ligas de titânio Ti6Al4V com sucesso, porém, exigindo a otimização do projeto da ferramenta.

Rahnam, Kumar e Salam [53] avaliaram o uso de MQFC no fresamento de aço ASSAB 718 HH com 35HRc (equivalente ao aço P20), onde empregaram ferramentas com insertos de metal-duro sem revestimento e compararam a aplicação de MQFC com o jato convencional de fluido de corte e com a usinagem a seco. Melhores resultados de vida, forma de cavacos mais adequada e menores rebarbas foram obtidas com MQFC. Kishawy *et alli* [54], no fresamento de ligas AlSi (A356) com metal-duro e metal-duro revestido com diamante, mostram resultados favoráveis de vida de ferramenta e esforços de corte para a aplicação de MQFC. Kardekar [44] comparou MQFC *versus* jato de fluido de corte e usinagem a seco no fresamento frontal da liga AlSi A380 e sugere que MQFC é comparável e até superior às demais alternativas em altas velocidades de corte.

No Brasil o emprego de MQFC em ambiente industrial é muito modesto, mas a tecnologia de MQFC e a usinagem a seco se difundiram em indústrias da Europa, Japão e Estados Unidos. Algumas empresas comercializam soluções em geradores de *spray* de MQFC, máquinas-ferramenta e sistemas de processamento de névoa específicos. Yoshimura [55] aplicou com sucesso a usinagem a seco para o processo de fresamento de engrenagens e MQFC para a furação na empresa Toyota do Japão. Todo o processo teve que ser revisado, envolvendo adaptações na máquina, em parâmetros de usinagem e no ferramental. O fabricante Horkos, que possui uma linha de máquinas-ferramenta desenvolvida para operações com MQFC, menciona ter cerca de 250 máquinas dedicadas operando em indústrias nos Estados Unidos, com destaque para a fábrica de transmissões da Ford-Livonia em Warren, Michigan [56]. Outros fabricantes como a Cross Hüller, Grob e Heller também possuem modelos específicos vendidos principalmente para indústria automobilística. A DaimlerChrysler fabrica em larga escala, desde 2003, componentes de alumínio do eixo traseiro em centros de usinagem a seco [43]. O Ministério Alemão de Educação e Pesquisa possui um projeto chamado "*Forschung für die Produktion von Morgen*" ("Pesquisa para a produção do amanhã") onde várias áreas de produção e empresas foram convertidas para MQFC em projetos de pequeno e médio porte. A **Tabela 2-4** resume experiências de projeto em parceria com o Departamento de Tecnologia de Usinagem de Dortmund para vários ramos de indústria.

Tabela 2-4 – Exemplos de desenvolvimentos ligados ao projeto "*Forschung für die Produktion von Morgen*" [43].

Setor	Componentes	Material	Processos	Motivação
Fornecedores de automobilísticas	Regulador de pressão	GD- AlSi12Cu4	Fresamento, Furação e Alargamento	8% Redução dos custos de componentes
Fabricantes de prensas	Engates com furos e roscas	Ck45	Fresamento, Furação, Rosqueamento e Alargamento	Redução do tempo de ciclo de 10,49 min p/ 7,32 min
Fabricantes de automóveis	Caixas de câmbio	20MoCr4 endurecido	Geração por conformação	Redução de custos ligados ao meio ambiente em cerca de 5%
Componentes Eletrônicos	Elementos de conexão < 1 cm ³	Bronze	Furação, Fresamento	Alta dissipação da lubrificação por óleo
Cilindros Pneumáticos	Conector	GD- ZnAl4Cu1 fundido	Rosqueamento e sangramento	Limpeza dos arredores da máquina, redução de custo com fluidos de corte, menos custos de manutenção e limpeza, aumento dos parâmetros de corte
Fabricantes de Moldes e Matrizes	Ferramentas	Aços ferramenta	Fresamento e torneamento	80% de redução no tempo de manutenção e limpeza, melhor qualidade superficial e tempo de ciclo menor
Aviação	Componentes integrais da aeronave	Ligas diversas	Fresamento	Proteção do meio ambiente e da máquina-ferramenta com menor custo de aquisição

2.9. AÇOS DE MÉDIO CARBONO

Os aços de médio carbono pertencem à categoria dos aços carbono (não ligados), como mostra a Figura 2-32. São amplamente aplicados na indústria para a fabricação de diversos componentes estruturais, como engrenagens, bielas e eixos. São compostos basicamente por ferrita (fase alfa), perlita e cementita (Fe₃C). A formação de cavacos geralmente é adequada (cavacos curtos) e, em condições normais, não há dificuldade de se obter superfícies com bom acabamento. À medida que os teores de perlita e cementita aumentam, a abrasividade do material cresce, exigindo ferramentas mais rígidas e resistentes ao desgaste.

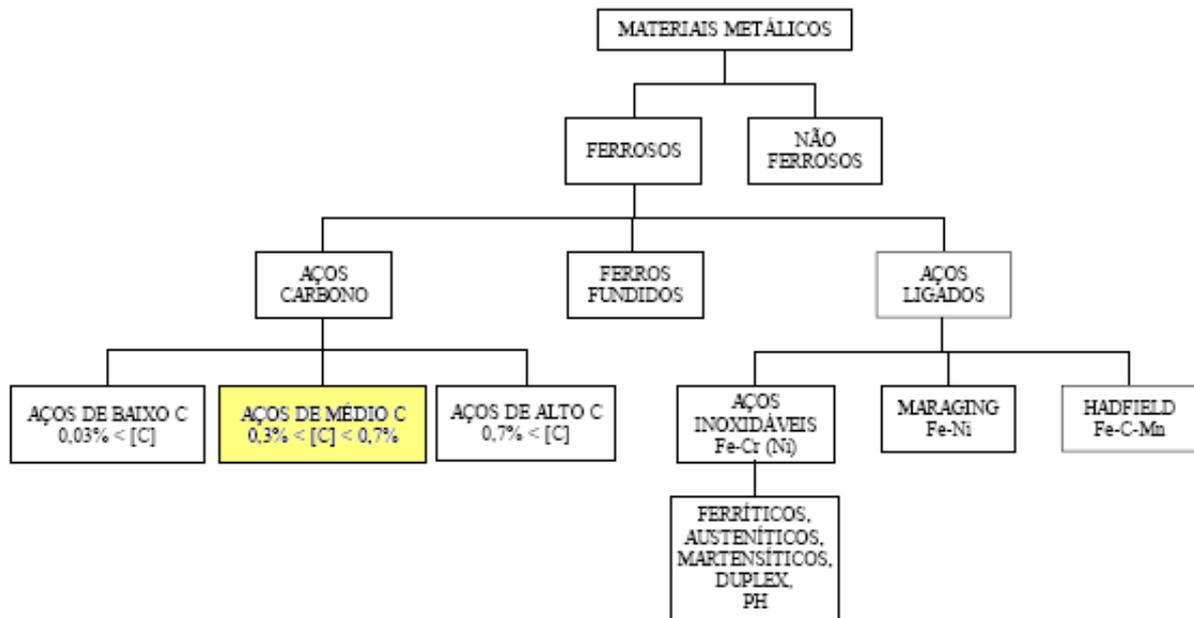


Figura 2-32 – Classificação dos materiais metálicos adaptada de Pannoni [57].

2.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O ESTADO DA ARTE

Os fluidos de corte têm um papel de grande relevância no processo de usinagem, seja por sua contribuição positiva, seja pelos impactos negativos que eles geram no processo ou no meio onde estão inseridos. Como há uma tendência recente de maior valorização dos aspectos negativos, alternativas para minimizar estes efeitos estão ganhando projeção, dentre as quais se destacaram a usinagem a seco e com MQFC no meio industrial internacional. Entretanto, a readequação dos processos não é tarefa simples, o que é evidenciado pela diversidade de variáveis afetadas, gerando diferentes soluções aplicadas por pesquisadores de acordo com a operação estudada. As ferramentas precisaram evoluir e se especializar tanto na tecnologia de materiais como na concepção geométrica; surgiram várias opções de geradores de *spray* buscando atender as particularidades de cada aplicação de MQFC; a própria formulação dos fluidos teve de se ajustar a novos requisitos e maior atenção foi dispensada à extração do calor e dos cavacos. Levando em conta esses aspectos tecnológicos, o próximo capítulo apresenta a aplicação industrial de MQFC que foi objeto de estudo neste trabalho, discutindo a metodologia dos ensaios e o aparato experimental envolvido.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA E APARATO EXPERIMENTAL

O presente trabalho foi desenvolvido nas dependências de um fabricante de motores elétricos, utilizando eixos que integram a produção regular de seus produtos. Foram selecionados eixos que compõem pequenos motores industriais e alguns da chamada “linha branca”, que compreendem os motores para eletrodomésticos em geral. O fluxograma da **Figura 3-1** resume as principais etapas do processo de usinagem de um eixo para motores elétricos.

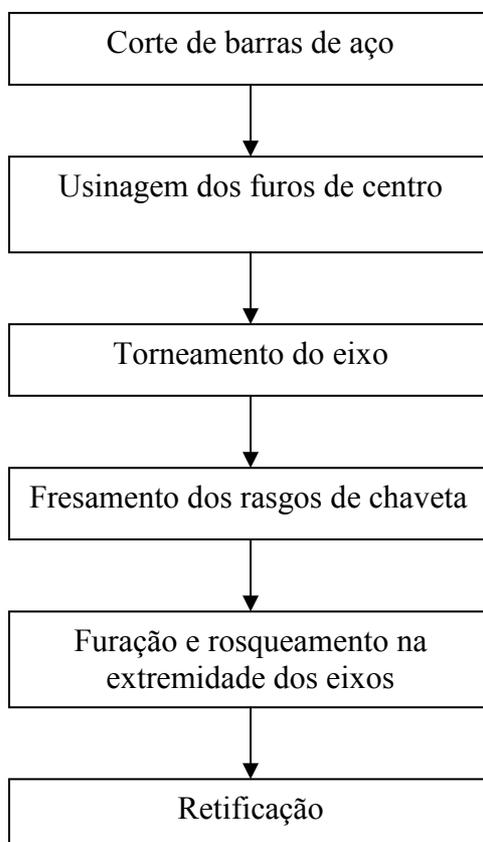


Figura 3-1 – Etapas principais de usinagem de um eixo para motores elétricos.

Um projeto mais amplo foi desenvolvido na empresa, estudando a aplicação de MQFC em praticamente todas as etapas do processo de usinagem de eixos, porém o presente texto abrange somente a etapa de furação e rosqueamento. Essa é, na realidade, a etapa mais complexa para a implementação de MQFC, pois envolve dois processos onde a eficácia de atuação dos fluidos de corte é muito sensível. Por um lado, o processo de furação trabalha

com velocidade de corte variável ao longo do gume, aumentando o atrito e dificultando a remoção, especialmente no centro da broca; também há dificuldades de penetração do fluido de corte na região de trabalho e de expulsão dos cavacos produzidos [1]; por outro lado, o rosqueamento envolve taxas de deformação elevadas do material em função dos grandes avanços impostos pelos passos de rosca, o que implica em condições de pressão e atrito desfavoráveis à ação dos fluidos de corte na região de trabalho [3]. Como as duas operações são realizadas em conjunto na mesma etapa do processo de usinagem de eixos para motores elétricos, não podem ser mutuamente desvinculadas.

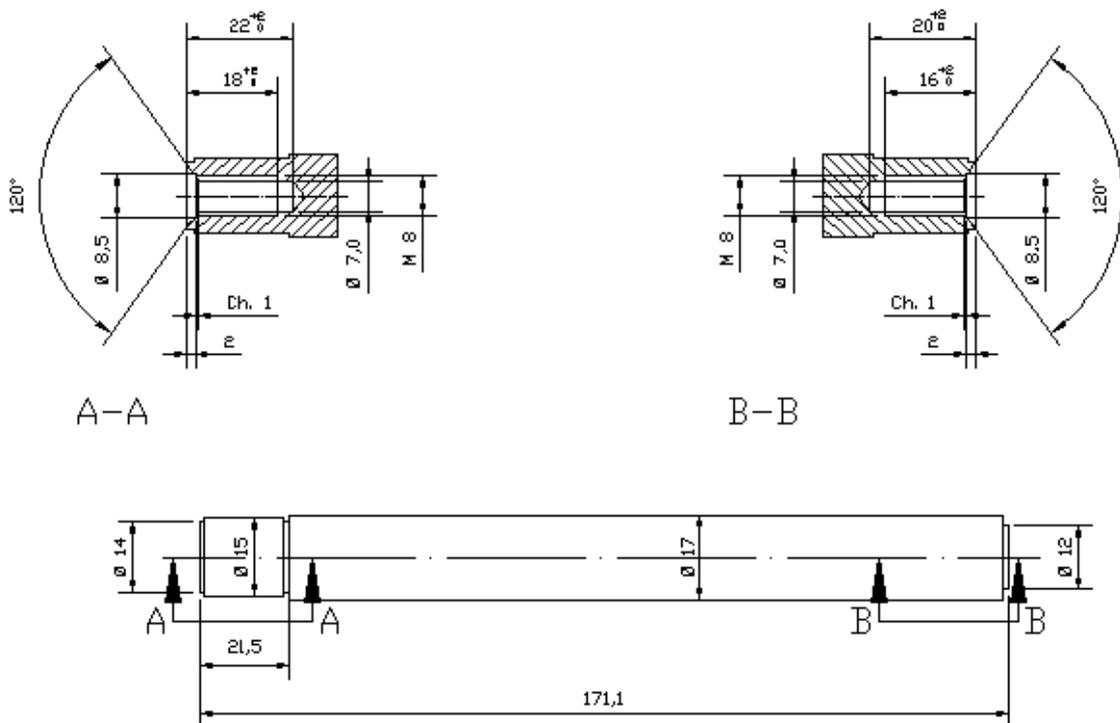
Para cada ferramenta de furar e rosca ensaiadas, mediu-se a vida em termos de percurso total usinado, conforme critérios descritos nos tópicos 3.6 e 3.7 deste capítulo. As comparações de vida apresentadas nos gráficos do capítulo 4, para cada forma de aplicação de fluido de corte, concepções de ferramentas e revestimentos, indicam as tendências e as melhores condições de trabalho, levando em conta aspectos técnicos e ecológicos para a etapa de usinagem de eixos de motores elétricos selecionada.

3.1. CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES USINADOS

A principal matéria-prima utilizada na fabricação dos eixos é o aço ABNT 1045 fornecido pela Gerdau S.A. na forma de barras cilíndricas com 6m de comprimento e com certificado de qualidade assegurada quanto às propriedades especificadas. Trata-se de um aço estrutural de médio carbono, cuja faixa de dureza Brinell especificada vai de 163 a 210HB e que possui composição química conforme a **Tabela 3-1**. Nos ensaios, foram usadas barras com diâmetros de 17,15mm (quase 60% do total de eixos usinados), 18,0mm, 19,05mm, 22,23mm, 25,4mm, 31,75mm, 38,1mm ou 44,45mm, usinadas nas etapas que antecedem a furação e rosqueamento, conforme seqüência da **Figura 3-1**. Um croqui com as dimensões principais de um eixo para motor elétrico se encontra na **Figura 3-2**, com a região de interesse deste trabalho mostrada nos cortes A-A e B-B. Eixos com rosca métrica M8x1,25 com uma ou duas pontas roscadas foram escolhidos para a maior parte dos ensaios. Testes complementares foram realizados com eixos que possuem roscas métricas M10x15, buscando extrapolar a análise para eixos semelhantes à linha de componentes selecionada para estudo.

Tabela 3-1 – Propriedades do aço ABNT 1045 utilizado nos ensaios.

CARACTERÍSTICAS		REQUISITO
a) Composição Química	Carbono (C)	0,37 a 0,50%
	Manganês (Mn)	0,60 a 0,90%
	Fósforo (P)	máx. 0,040%
	Enxofre (S)	máx. 0,050%
	Silício (Si)	0,15 a 0,30%
	Cromo (Cr)	máx. 0,20%
b) Resistência a tração (MPa)		mín. 520
c) Limite de escoamento (MPa)		mín. 290
d) Alongamento em 2" (%)		mín. 16
e) Características metalográficas (%)	Perlita	máx. 60
	Ferrita	mín. 40

**Figura 3-2** – Croqui de um eixo para motor elétrico em aço ABNT 1045 com duas extremidades roscadas.

As operações de furar e roscar são realizadas em lotes tipicamente de 200 a 500 peças. A alternância de produtos similares com diferentes diâmetros e profundidades de roscas são freqüentes ao longo do dia numa mesma máquina-ferramenta. A máquina-ferramenta onde se realizaram os ensaios usina, na sua maioria (cerca de 65%), roscas com profundidade de 2 vezes o diâmetro e furos de 2,5 vezes o diâmetro. O restante praticamente consiste de eixos com profundidade cerca de 3 vezes o diâmetro na furação e 2,5 vezes o diâmetro no

rosqueamento. O emprego de produtos reais, e não de corpos-de-prova, permite gerar informações tecnológicas no ambiente fabril, identificando fenômenos que poderiam não ser visíveis em um corpo-de-prova de laboratório, e que eventualmente se constituem em obstáculos para implantação de MQFC no contexto industrial.

Na linha de eixos para motores elétricos estudada, não existem restrições de projeto quanto à rugosidade, circularidade e cilindridade dos pré-furos para roscas, razão pela qual tais grandezas não foram mensuradas nos ensaios. Os únicos controles de qualidade nesta etapa são feitos com auxílio de um paquímetro universal e com calibrador de rosca tipo “passa – não passa” (**Figura 3-3**). O paquímetro controla as profundidades de rosca e furo conforme desenho do eixo (exemplificado na **Figura 3-2**) e o calibrador, devidamente verificado e rastreado a padrões do INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, permite verificar se a rosca produzida está dentro das tolerâncias admissíveis pelas correspondentes normas de dimensões de roscas.



Figura 3-3 – Calibrador, código 30435 HEF OS 7200C, para controle de roscas métricas M8x1,25.

3.2. MÁQUINA-FERRAMENTA E DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO DOS EIXOS

A máquina-ferramenta selecionada dentro da planta fabril foi um centro de usinagem vertical, modelo Ultimill V3000, do fabricante japonês Mori Seiki, conforme ilustrado na **Figura 3-4**. Possui potência instalada de 27kW, rotação máxima do eixo-árvore de

15.000rpm, projetado para passagem de fluido de corte por dentro do mesmo. O centro de usinagem trabalha exclusivamente com eixos de pequeno porte para motores elétricos e possui comando CNC do próprio fabricante Mori Seiki, modelo MSG-805. A programação foi feita manualmente em linguagem EIA/ISO para execução dos ensaios.



Figura 3-4 – Centro de usinagem modelo Ultimill V3000.

Os eixos são fixados verticalmente no dispositivo ilustrado na **Figura 3-5**, que é especialmente projetado para furação e rosqueamento de vários eixos numa única fixação, reduzindo assim os “tempos mortos” por peça produzida. Os “tempos mortos”, também conhecidos como “tempos secundários de execução”, compreendem os tempos para a realização de trabalhos acessórios que se repetem regularmente para cada peça como: ligar a máquina, trocar e aproximar ferramenta, ajustar avanço e rotação, parar a máquina, afastar a ferramenta [9]. O acionamento do dispositivo é feito hidraulicamente, garantindo boa fixação das peças e mantendo a extremidade superior livre para execução das operações de usinagem. Os prismas acionados hidraulicamente do dispositivo garantem a centralização das peças.

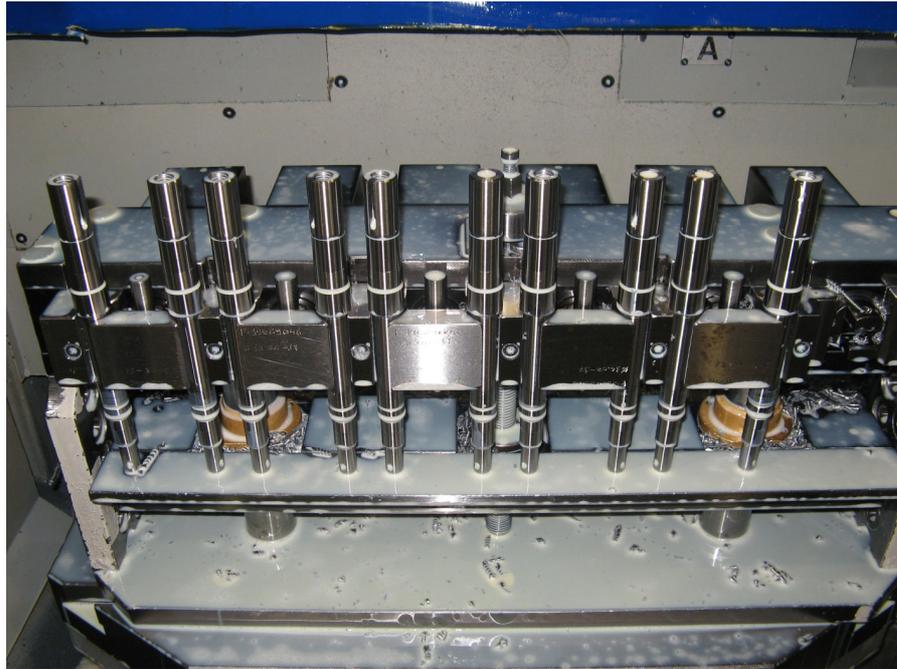


Figura 3-5 – Dispositivo para fixação de eixos na etapa de furação e rosqueamento de suas extremidades.

3.3. PREPARAÇÃO E ESTRATÉGIA DE USINAGEM

A cada lote de eixos programado pela produção e selecionado para os ensaios, as adequações foram feitas manualmente no programa CNC e salvas no banco de dados da empresa. Os eixos chegam a esta etapa sem superfícies brutas, mas com furo de centro de referência das operações anteriores, com 60° entre as faces e demais dimensões conforme a **Figura 3-6**. Embora se tenha conhecimento que a presença de um furo de centro teoricamente interfira negativamente na vida das ferramentas, o acréscimo de uma operação anterior à furação para eliminação dos furos de centro agregaria custos de usinagem indesejados ao processo produtivo em questão. Não havendo relevante histórico de quebra de brocas ou outro argumento que justifique essa operação adicional em regime de produção, os eixos são primeiramente furados, escareados e finalmente roscados nas medidas finais de desenho, tudo na mesma fixação e com a mesma referência de centralização máquina-ferramenta. O escareamento é uma operação secundária, executada a seco com baixo custo e que visa apenas evitar danos no filete de entrada da rosca usinada, não sendo objeto de interesse nesta análise.

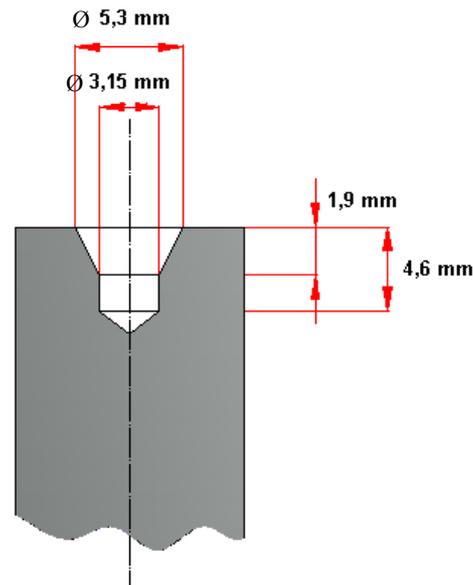


Figura 3-6 – Dimensões do furo de centro na extremidade de eixos antes da etapa de furar e roscar.

3.4. FLUIDOS DE CORTE E FORMAS DE APLICAÇÃO

Diferentes tipos de fluidos foram utilizados nos ensaios, cada qual dedicado à sua respectiva forma de aplicação: jato tradicional ou “*spray*” de MQFC. Para os ensaios com jato, utilizou-se um óleo emulsionável denominado Alusol XT e fornecido pelo fabricante Castrol. Esse fluido, de base éster com mistura de óleos minerais, é isento de cloro, nitritos e fenóis; também possui aditivos de extrema pressão para operações que exigem boa lubricidade, como a furação e rosqueamento. O Alusol XT foi previamente selecionado pela fábrica de motores elétricos com base em testes de diversos tipos de fluidos em diferentes concentrações. A concentração de 20% foi determinada e adotada pela empresa como o melhor compromisso entre custo e desempenho nos testes de homologação do produto.

Conforme descrito no tópico 2.8.6, os fluidos de corte indicados pela literatura para aplicação de MQFC são os *fatty alcohols* e os ésteres sintéticos, sendo que estes últimos apresentam melhores características lubrificantes que os primeiros. Baseado nisso, foi primeiramente utilizado nos ensaios de furação em MQFC um fluido de base éster sintético, especialmente desenvolvido pela empresa Blaser Swissslube para aplicações de MQFC com demanda de boa lubricidade. Tal fluido, denominado pelo fabricante por Vascomill MMS SE1, é biodegradável, tem densidade de $0,85\text{g/cm}^3$ a 20°C , é muito resistente à corrosão, possui viscosidade cinemática a 40°C de $20\text{mm}^2/\text{s}$, tem aditivos de extrema pressão e é isento

de óleo mineral e cloro. Já nos ensaios complementares de furação e em todos os ensaios de rosqueamento, optou-se por um segundo fluido de base éster sintético, por razões ligadas a custo e disponibilidade de amostras, denominado Nor SSL. Produzido pela empresa Rhenus Lub especificamente para aplicações de MQFC, também apresenta boa lubricidade, é biodegradável, resistente à corrosão, tem $0,92\text{g/cm}^3$ de densidade a 20°C , e sua viscosidade cinemática é maior ($47\text{mm}^2/\text{s}$ a 40°C).

Nos ensaios de furação, empregou-se jato tradicional de fluido de corte e “*spray*” de MQFC, ambos com alimentação interna, ou seja, por dentro do eixo-árvore da máquina-ferramenta até a extremidade das ferramentas. Isso garante um melhor acesso dos fluidos à região de corte do que na alimentação externa, possibilitando melhores resultados de vida de ferramenta e minimizando eventuais variações de desempenho provocadas pelas diferentes profundidades de corte adotadas nos ensaios. No rosqueamento, ambas as formas de aplicação citadas foram empregadas, adicionando, porém, testes com jato externo. O jato externo de fluido de corte era a forma de aplicação inicialmente empregada pela empresa onde os ensaios foram realizados.

O sistema que introduz o “*spray*” de MQFC no eixo-árvore está esquematizado na **Figura 3-7**. Trata-se de um sistema fornecido pela empresa SKF Willy Vögel AG, modelo LubriLean VarioPlus, que foi adquirido e instalado especificamente para a realização dos ensaios. As partes “1” a “5” numeradas na **Figura 3-7** estão incorporadas num único corpo mostrado na **Figura 3-8**. A alimentação procede de uma rede industrial com ar comprimido filtrado e desumidificado a 6bar de pressão. A válvula de admissão “1” é comandada por solenóide interligada à válvula controladora de pressão “2”, de forma que a admissão de ar comprimido da linha é liberada automaticamente toda vez que a pressão dentro do sistema atinge um mínimo de 3,6bar, sendo fechada novamente quando sistema atinge 4bar. Assim, a pressão dentro do cilindro com *venturi* é mantida numa estreita faixa que uniformiza a dimensão das partículas atomizadas, em torno de $0,5\mu\text{m}$, segundo o fabricante do equipamento. O controle da vazão de fluido de corte se dá manualmente através da válvula reguladora de vazão “3” cujo mostrador é o sensor analógico “4”. A válvula “5” é para proteção do cilindro contra uma acidental sobrecarga e a válvula “6”, que se encontra na **Figura 3-9**, é comandada por outro solenóide com sinal de 24V em corrente contínua, cuja abertura e fechamento libera e bloqueia quase que instantaneamente a passagem do “*spray*” para o eixo-árvore da máquina-ferramenta. Esse sinal foi incorporado ao comando CNC do centro de usinagem, permitindo que o acionamento e desligamento do “*spray*” para dentro do

eixo-árvore sejam comandados através de códigos escritos no programa CNC. O reservatório possui capacidade para 1,8 litros de fluido, com vazão regulável entre 1 a 150ml/h.

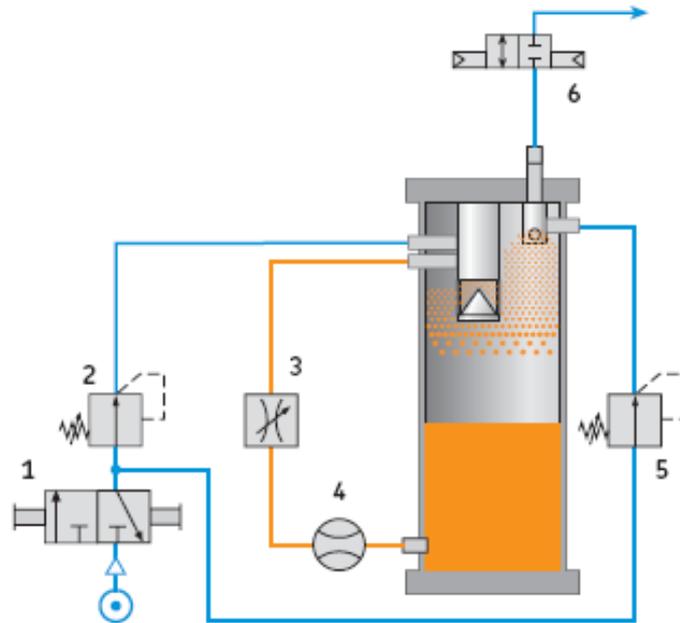


Figura 3-7 – Esquema de Funcionamento do gerador de MQFC.

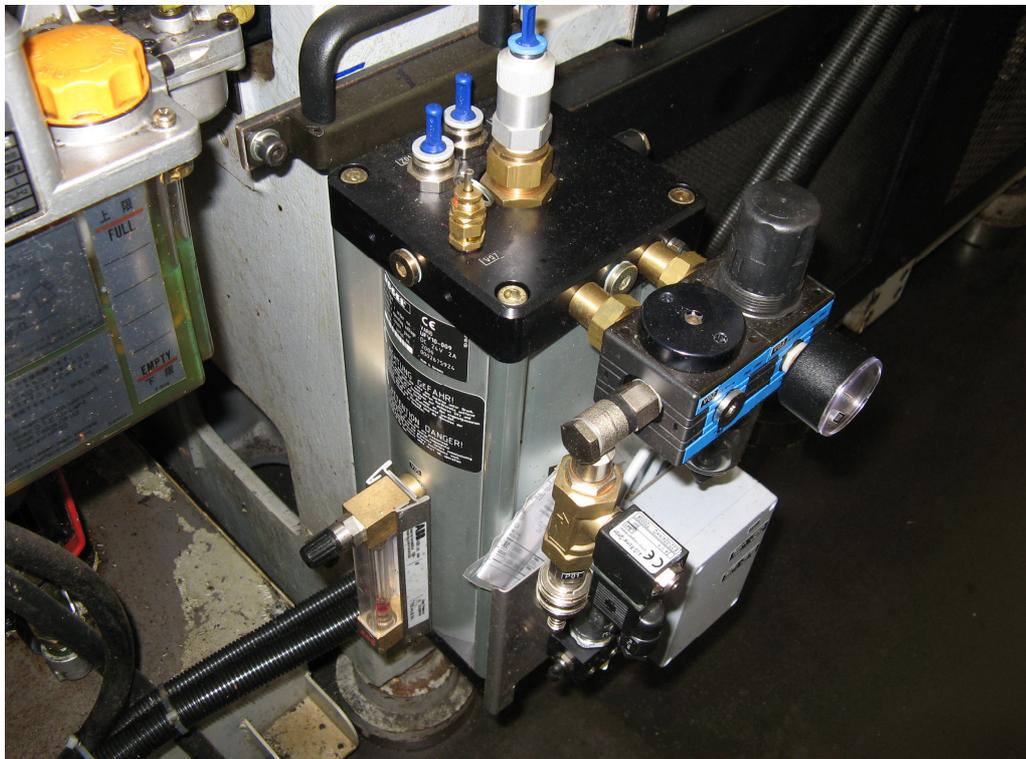


Figura 3-8 – Foto do equipamento gerador de MQFC, modelo LubriLean VarioPlus.



Figura 3-9 – Válvula com acionamento por solenóide para liberação e bloqueio do *spray* pelo eixo-árvore da máquina-ferramenta.

A **Figura 3-10** mostra o sistema de alimentação por jato interno de alta pressão do fluido de corte, modelo SAP5027 do fabricante MachSystem, com reservatório, hidrociclone e filtro para limpeza do fluido recirculado integrados no sistema. A bomba possui uma pressão de 50kgf/cm^2 e vazão na ponta das ferramentas de $6,6\text{l/min}$.



Figura 3-10 – Bomba para alimentação interna do jato de fluido de corte.

3.5. PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO

A concentração do fluido Alusol XT foi controlada através de um refratômetro tipo Brix 0-32% do fabricante Salvi Casagrande. O índice de refração do fluido de corte é função da concentração, cujos valores de conversão são informados pelo fabricante. No caso do fluido Alusol XT, o fator de refração para a concentração de 20% é 1,4. Foi considerada aceitável uma variação de até 2% na concentração, fora da qual se fez a correção pela adição do elemento faltante (água ou Alusol XT). A mistura é agitada até a homogeneização durante alguns minutos e efetua-se nova medição do índice de refração. Repete-se o procedimento até que o banho esteja dentro da condição especificada.

A verificação das vazões dos jatos de fluido de corte foi realizada com auxílio de um recipiente plástico, um cronômetro digital e uma balança do fabricante URANO, modelo UR10000, com capacidade de até 25kg e com erro máximo de +/- 2g ou +/- 5g, dependendo da faixa de medição utilizada. O procedimento de medição consistiu em medir a massa do recipiente vazio, acionar o jato dentro do recipiente durante 20 segundos e medir novamente a massa do recipiente com fluido de corte após o tempo controlado com auxílio do cronômetro. A diferença entre a massa do recipiente vazio e cheio, dividida pela densidade do fluido de corte resulta no volume de fluido fornecido pelo jato ao longo de 20 segundos. Como o fluido de corte usado nos ensaios com jato é diluído em água, a densidade usada no cálculo é ponderada pela concentração. O procedimento foi repetido e extraído uma média, que é então convertida para a vazão em litros por minuto. O Anexo 1 apresenta um exemplo de cálculo da vazão do jato externo no centro de usinagem Ultimill V3000.

Para o gerador de MQFC, a verificação foi realizada com auxílio da mesma balança UR10000. O peso total do equipamento com fluido excede 10kg, não havendo balança de maior precisão disponível para suportá-lo no ensaio. O sistema foi mantido acionado sobre a balança durante um período cronometrado até que se observou uma redução na massa total de 5g. Em função do erro máximo do equipamento, a massa consumida pode assumir qualquer valor entre 0 e 10g. O tempo transcorrido foi de 37,37 minutos para o fluido de corte Nor SSL, o que corresponde a uma vazão média entre 1 (valor mínimo do equipamento) e 17,5ml/h, considerando a densidade de $0,92\text{g/cm}^3$. Confrontou-se a medição com o consumo médio semanal de fluido de corte. Cerca de um litro é repostado semanalmente, o que corresponde a um intervalo de 88 horas de serviço em dois turnos. Se o equipamento ficasse ligado ininterruptamente, este consumo corresponderia a uma vazão média de 11,4ml/h.

3.6. ENSAIOS DE FURAÇÃO

Utilizaram-se três diferentes geometrias de brocas de metal-duro, todas com ângulo de hélice 30° , passagem para alimentação interna do fluido de corte e gumes principais com curvatura côncavo-convexa para melhor compromisso entre resistência e forças de corte nas diferentes velocidades de corte ao longo do gume (*vide* o tópico 2.6.1). Trata-se de ferramentas consideradas “de alto desempenho” agregando diversas características de geometria e matérias-primas aprimoradas para aplicações onde se deseja elevada produtividade na indústria. As ferramentas são fornecidas em embalagens plásticas individuais para evitar danos por impacto e uma vez retiradas da embalagem são imediatamente fixadas em mandril hidráulico. Este tipo de fixação assegura batimentos radiais inferiores a $10\mu\text{m}$ e tem por objetivo minimizar o desbalanceamento das solicitações mecânicas e reduzir vibrações. O controle de batimento foi feito em cada montagem com auxílio de uma máquina de *preset* do fabricante Zoller, modelo BRAVO B MAN, mostrada na **Figura 3-11**. Uma vez montada e verificada, a ferramenta segue para o centro de usinagem, sendo fixada no magazine da máquina.



Figura 3-11 – Máquina de *preset* de ferramentas.

Segue um resumo das características peculiares de cada tipo de broca de metal-duro testada:

Geometria 1 – denominada pelo fabricante de RT100U, com redução do gume transversal no topo tipo *Split Point* (conforme **Figura 2-16** no tópico 2.6.1), quinas com pequeno *honing*, largura de guias em torno de 0,4mm, substrato de metal duro ISO K30/40 com grão ultra-fino e 10% Cobalto. Nessa geometria se concentraram a maior parte dos ensaios pela sua maior disponibilidade e para reconhecimento inicial do comportamento das ferramentas no processo estudado. Diferentes revestimentos foram avaliados, como será detalhado adiante, porém o revestimento inicialmente adotado foi um multicamada PVD composto de TiN e TiAlN denominado “Firex®” pelo fabricante Guhring. O “Firex®” é aplicado em temperaturas da ordem 500°C em espessuras que podem variar entre 1,5 e 5µm, com uma dureza entre 3000 e 3300HV.

Geometria 2 – especialmente desenvolvida pela Guhring para os testes, possui topo com redução do gume transversal tipo *Split Point* e ângulos de alívio aumentados, quinas com pequeno *honing*, canais de saída maiores (núcleo reduzido), projetados para compensar a ausência de fluido de corte abundante no transporte de cavacos. Foi aplicado sobre essa geometria um revestimento PVD com baixa temperatura de aplicação, denominado “Molyglide®” pelo fabricante Guhring, com uma espessura de camada inferior a 1µm. O Molyglide® tem como base TiAlN com uma camada externa de MoS₂ e trata-se de um revestimento especialmente desenvolvido para reduzir atrito na saída dos cavacos. O substrato de metal-duro é o mesmo da geometria 1.

Geometria 3 – denominada pelo fabricante Kennametal de B256A - HPC, com redução do gume transversal no topo tipo “S” (conforme **Figura 2-16** no tópico 2.6.1) e perfil positivo, ângulo de ponta de 135°, quinas com *honing* reforçado, e substrato de metal duro ISO K20 com grão fino e 10% Cobalto da classe KC7315. Essa classe possui revestimento multicamada PVD de TiN e TiAlN, com espessura entre 4 e 6µm, conforme mostra a **Figura 3-12**.

Visto que a principal característica de interesse na furação de eixos para motores elétricos é a vida das brocas, essa foi a variável de saída avaliada nos ensaios. O critério de fim de vida foi estabelecido com base em parâmetros verificáveis no ambiente de produção. Testes preliminares com a geometria 1 e o revestimento “Firex®” foram realizados para analisar o comportamento ao longo do período de utilização. Verificou-se que as brocas primeiramente geravam cavacos em forma de hélice cônica curta (conforme a ISO 3685) com tamanho e forma praticamente uniformes, como ilustrado na **Figura 3-13**. Entretanto, após

certo período, iniciou-se a geração de faíscas seguida por uma alteração repentina da forma dos cavacos para fitas emaranhadas em torno da broca. Verificações das brocas neste estágio indicaram a presença de lascamentos nas quinas. Persistindo na utilização das brocas, houve colapso catastrófico. Adotou-se a mudança de forma dos cavacos como critério de fim de vida pela sua fácil visualização, interrompendo os ensaios nesse estágio. Por uma questão de segurança, as brocas ensaiadas eram verificadas entre um lote e outro de fabricação para detectar eventuais anomalias após um percurso inicial de furação de cerca de 10 metros.

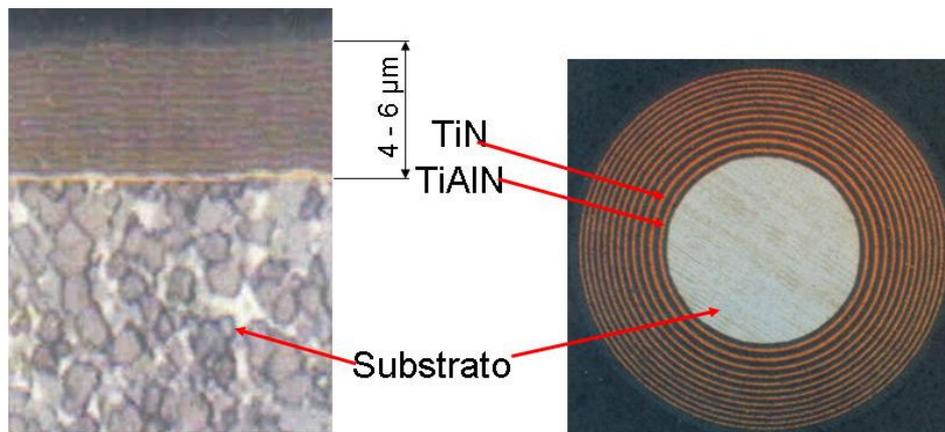


Figura 3-12 – Revestimento da classe KC7315 [6].



Figura 3-13 – Forma dos cavacos normalmente gerados pelo processo de furação de eixos.

Para auxiliar na análise dos resultados, fotografias de brocas no fim de vida foram tiradas em um estéreo-microscópio, modelo DV4 da Zeiss (**Figura 3-14**), com ampliações de 16 a 64 vezes, empregando uma máquina fotográfica digital PowerShot A700 da Canon. Algumas fotos com maior ampliação foram feitas em microscópio Óptico Reichert PolyVar2 MET com ampliação entre 40 e 2000 vezes, interligado a uma Câmera Evolution LC da empresa Media Cybernetics e com interface para um PC Pentium 4 1,6Ghz de 512MB RAM, conforme mostra a **Figura 3-15**. As fotografias eram processadas com auxílio do software analisador de imagens Image-Pro Express que permite inserir linhas auxiliares para medição de dimensões lineares, como exemplificado na **Figura 3-16**. Através das imagens de microscopia, foram verificados os danos nas guias, nas quinas e, eventualmente, quando aplicável, danos ao longo do gume principal.



Figura 3-14 – Estéreo-microscópio modelo DV4 da empresa Zeiss.



Figura 3-15 – Bancada com microscópio óptico acoplado à câmera digital e PC com software analisador de imagens.

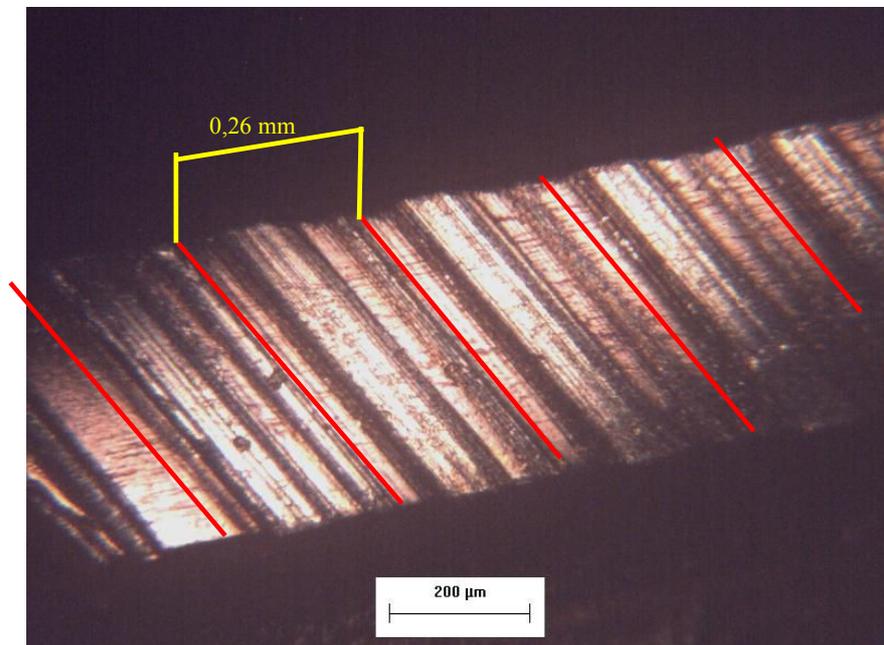


Figura 3-16 – Distância aproximada entre sulcos em uma guia de broca desgastada. Medição feita com auxílio do software Image-Pro Express.

Uma vez concluídos os testes preliminares, os ensaios de vida foram divididos em 3 etapas:

Primeira Etapa – Consiste de ensaios para verificar se os parâmetros indicados pelo fabricante são adequados para as etapas subsequentes. Apenas a geometria “1” com revestimento “Firex®” e no diâmetro de 7mm foi utilizada nesta etapa. As três condições de corte empregadas se encontram na **Tabela 3-2**.

Tabela 3-2 – Ensaios da primeira etapa de furação.

	Geometria da Broca	Revestimento	Vel. Corte (m/min)	Avanço (mm)	Forma de aplicação	Nº amostras
Condição 1	Geometria 1	Firex® (multicamada TiN+TiAlN)	105	0,22	Jato interno	2
Condição 2			95	0,24	Jato interno	2
Condição 3			105	0,3	Jato interno	3

Segunda Etapa – É a etapa principal do estudo de furação, sendo ensaiadas diferentes geometrias de brocas de metal-duro, todas com diâmetro de corte de 7mm, mas com diferentes revestimentos e formas de aplicação dos fluidos de corte, conforme **Tabela 3-3**. Os resultados foram confrontados com a melhor condição da primeira etapa (Condição 1). Aplicou-se a metodologia estatística de Análise Variância (ANOVA) para identificar se as diferenças obtidas nos resultados são estatisticamente diferentes, considerando um intervalo de confiança de 95%. Testes estatísticos de comparação entre médias, chamados testes de “Tukey” complementam a análise. O cálculo dos coeficientes usados para a ANOVA e os testes de “Tukey” se encontram no Anexo 2.

Tabela 3-3 – Ensaios da segunda etapa de furação.

	Geometria da Broca	Revestimento	Vel. Corte (m/min)	Avanço (mm)	Forma de aplicação	Nº amostras
Condição 4	Geometria 1	Firex® (multicamada TiN+TiAlN)	105	0,22	MQFC	2
Condição 5	Geometria 1	AlboNiT® (TiAlCN)	105	0,22	MQFC	2
Condição 6	Geometria 1	nACo® (nc-TiAlN/a-Si ₃ N ₄)	105	0,22	MQFC	2
Condição 7	Geometria 2	Base Moliglyde® (TiAlN+MoS ₂)	95	0,24	MQFC	2
Condição 8	Geometria 3	KC7315® (multicamada TiN+TiAlN)	105	0,22	MQFC	2
Condição 9	Geometria 3	KC7315® (multicamada TiN+TiAlN)	105	0,22	Jato interno	2

A Geometria “2” apresentou quebra prematura da broca ensaiada na condição de avanço e velocidade de corte padronizada, razão pela qual não foi repetido o ensaio e o mesmo foi substituído pela condição “7” para análise estatística. As condições “5” e “6”

empregaram revestimentos PVD desenvolvidos pela empresa Plaitit, sendo o nAco® pertencente à categoria dos “supernitretos” nanocompostos descritos no capítulo 2. A nanoestrutura é composta de grãos de TiAlN envoltos numa matriz amorfa de Si₃N₄. As propriedades principais de ambos os revestimentos se encontram resumidas na **Tabela 3-4**:

Tabela 3-4 – Propriedades dos revestimentos AlboNiT® e nAco®.

Designação	Composição	Dureza (HV)	Espessura	Configuração	Coefficiente de atrito
AlboNiT®	Carbonitreto de Titânio Alumínio (TiAlCN)	2600	1 a 4µm	Gradiente	0,25
nAco®	Nitreto de Alumínio Titânio em matriz de carboneto de silício (nc-TiAlN)/(a-Si ₃ N ₄)	4300	1 a 4µm	Nanocomposto	0,45

Terceira Etapa – Consiste de dois ensaios complementares, sem repetição, conforme **Tabela 3-5**, apenas indicando tendências na furação com broca de metal-duro de diâmetro 8,7 mm. Foi empregada a Geometria “3”, por ter apresentado os melhores resultados de vida na etapa anterior. Substituiu-se o fluido Vascomill MMS SE1 na aplicação de MQFC pelo Nor SSL, que foi também utilizado nos ensaios de rosqueamento, conforme será detalhado no próximo tópico.

Tabela 3-5 – Ensaio da terceira etapa de furação

Condição	Broca	Fornecedor	Vel. Corte (m/min)	Avanço (mm)	Fluido
A	B255A08700HPC KC7315	Kennametal	95,7	0,27	Alusol XT (20%)
B	B255A08700HPC KC7315	Kennametal	95,7	0,27	Rhenus Nor SSL

3.7. ENSAIOS DE ROSQUEAMENTO

Utilizaram-se ferramentas para roscas métricas M8 e M10, com as seguintes características técnicas:

Geometrias 1 e 2: denominadas respectivamente por Rasant V-40 e Rasant V-Dry segundo o fabricante Fette; com dimensões conforme norma DIN 371; 3 canais helicoidais

com ângulos de hélice de 40° (geometria 1) e 42° (geometria 2); chanfro e filetes de entrada conforme DIN 2197 forma “C”, com 2 a 3 filetes de entrada por canal; substrato de aço-rápido sinterizado com Vanádio e Cobalto; passagem central para fluido de corte e revestimento PVD multicamada de TiCN e TiN.

Geometria 3: denominada BP70 segundo o fabricante Vergnano; com dimensões conforme norma DIN 371; 3 canais helicoidais com ângulo de hélice de 45°; chanfro e filetes de entrada conforme DIN 2197 forma “C”; substrato de aço-rápido sinterizado com Vanádio e Cobalto; passagem central para fluido de corte, revestimento PVD monocamada TiN com 1 a 5 μ m de espessura e 2300HV de dureza.

Geometria 4: denominada pela referência 260/2 segundo o fabricante OSG; com dimensões conforme norma DIN 376; 3 canais helicoidais com ângulo de hélice de 35°; chanfro e filetes de entrada conforme DIN 2197 forma “C”; substrato de aço-rápido com 8% de Cobalto; sem passagem central para fluido de corte e sem revestimento.

A variável de saída monitorada foi novamente a vida das ferramentas, cujo critério de fim de vida é atingido quando não é mais possível introduzir o calibrador tipo “passa – não passa” (**Figura 3-3**) na peça usinada. Eventualmente, algumas ferramentas apresentaram colapso catastrófico antes desse critério ser atingido. Fotos complementam a análise das ferramentas que atingiram o fim de vida utilizando os equipamentos já descritos no tópico 3.6 deste capítulo.

Os ensaios de rosqueamento constituíram-se de duas etapas. A primeira foi um estudo preliminar com as geometrias 1, 2 e 3, diferentes formas de alimentação do fluido de corte, alguns revestimentos e velocidades de corte variadas a fim de compreender o comportamento das ferramentas no processo e identificar a melhor geometria, revestimento e velocidade de corte para a segunda etapa dos ensaios. A segunda etapa promove uma comparação entre a melhor combinação de variáveis sugerida pelos ensaios preliminares e o processo previamente existente na fábrica, que empregava a geometria 4 com alimentação de fluido de corte por jato externo.

A **Tabela 3-6** mostra as condições dos ensaios preliminares. Como o objetivo é identificar tendências no menor custo e tempo possível, não foram feitas repetições dos ensaios, exceto no primeiro, onde se buscava verificar a repetitividade de desempenho do ferramental no processo empregando MQFC. O revestimento nACo®, já descrito no processo de furação, também foi testado nesta etapa.

Tabela 3-6 – Ensaios de rosqueamento preliminares.

	Rosca	Macho de roscar	Revestimento	Vel. Corte (m/min)	Forma de aplicação	Nº amostras
Condição 1	M8	Geometria 1	TiCN+TiN	15	MQFC	5
Condição 2	M8	Geometria 1	TiCN+TiN	27,6	MQFC	1
Condição 3	M8	Geometria 1	nACo® (nc-TiAlN/a-Si ₃ N ₄)	27,6	MQFC	1
Condição 4	M8	Geometria 2	TiCN+TiN	15	MQFC	1
Condição 5	M10	Geometria 2	TiCN+TiN	15	MQFC	1
Condição 6	M10	Geometria 2	TiCN+TiN	34,6	MQFC	1
Condição 7	M8	Geometria 2	TiCN+TiN	27,6	Jato interno	1
Condição 8	M10	Geometria 2	TiCN+TiN	25	Jato interno	1
Condição 9	M8	Geometria 3	TiN	30	MQFC	1

A segunda etapa de ensaios se encontra resumida na **Tabela 3-7**. O processo pré-existente na máquina onde se realizaram os experimentos foi comparado à combinação mais produtiva das variáveis avaliadas na etapa preliminar, aplicando MQFC. A estruturação dos ensaios obedece ao modelo de experimento Fatorial Completo com duas variáveis e dois níveis. A primeira variável (fator A) diz respeito ao conjunto de parâmetros do processo, envolvendo geometria do macho, velocidade de corte e forma de aplicação do fluido de corte. O nível 1 do fator A (A1) corresponde ao processo pré-existente, ou seja, geometria 4 (260/2), com 12m/min de velocidade de corte e jato externo de fluido de corte. O nível 2 (A2) é o processo com 34,6m/min de velocidade de corte, geometria 3 e empregando MQFC. A segunda variável (fator B) é o diâmetro da rosca, que assume o nível 1 para M8x1,25 e o nível 2 para M10x1,5. Essa estruturação potencializa a aplicação de ANOVA (Análise de Variância) para verificação da influência de cada variável isoladamente ou suas interações.

Tabela 3-7 – Experimento fatorial de rosqueamento.

	Fator A: Processo	Fator B: Rosca	Macho de roscar	Revestimento	Vel. Corte (m/min)	Forma de aplicação	Nº amostras
Condição A1B1	A1=Original	B1=M8	Geometria 4	sem	12	Jato externo	2
Condição A1B2	A1=Original	B2=M10	Geometria 4	sem	12	Jato externo	2
Condição A2B1	A2=Proposto	B1=M8	Geometria 3	TiN	34,6	MQFC	2
Condição A2B2	A2=Proposto	B2=M10	Geometria 3	TiN	34,6	MQFC	2

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. ENSAIOS DE VIDA EM FURAÇÃO

A **Figura 4-1** mostra resultados de vida de brocas nos testes da primeira etapa, que corresponde às condições apresentadas na **Tabela 3-2** do capítulo 3. Todas as avaliações de vida de brocas são mensuradas em termos do percurso total de furação. Conforme discutido no capítulo 3, esta etapa avalia apenas a geometria RT100U do fabricante Guhring (geometria 1) com revestimento Firex® (TiAlN multicamada), usando jato interno de fluido de corte. O objetivo é verificar a melhor condição de avanço para os ensaios subsequentes. As barras de erros em cada coluna da **Figura 4-1** correspondem às amplitudes de vida obtidas em cada condição ensaiada. Calculando a variância para cada uma destas condições, obtiveram-se, respectivamente, valores de $0,020\text{m}^2$, $7,45\text{m}^2$ e $113,2\text{m}^2$. A dispersão da vida aumenta com o incremento do avanço, o que mostra que algum mecanismo de falha fortemente aleatório tem sua influência potencializada na medida em que o avanço cresce.

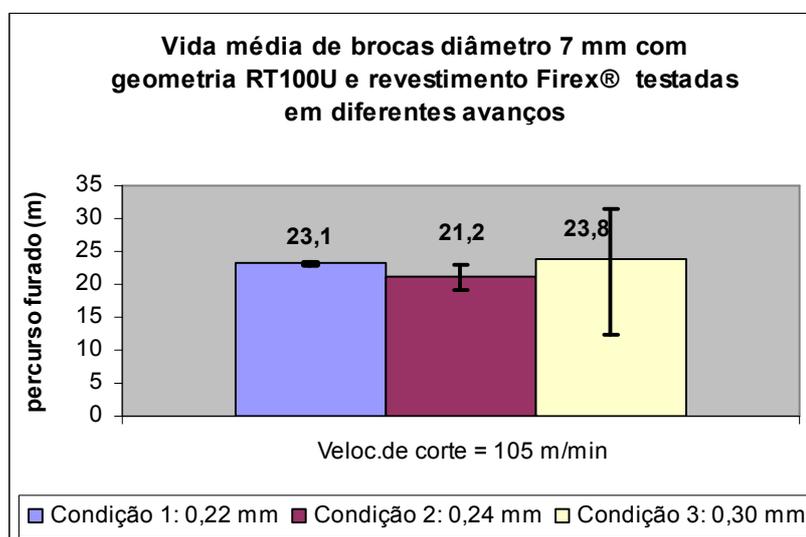


Figura 4-1 – Vida de brocas nas condições 1 a 3 da Tabela 3-2, utilizando jato interno de fluido Alusol XT a 20% de concentração.

Ao observar o estado das brocas no fim de vida, identificam-se lascamentos nas quinas e ao longo do gume principal (**Figura 4-2**). Como o surgimento e propagação de trincas no material são fenômenos aleatórios, conclui-se que o aumento na dispersão esteja intimamente

relacionado ao surgimento mais freqüente de trincas nas ferramentas, que evoluíram para os lascamentos observados. O incremento de avanço implica em aumento das tensões mecânicas e maior geração de calor que, por sua vez, aumenta os gradientes térmicos presentes entre a superfície e o núcleo da ferramenta quando se emprega o jato de fluido de corte. O crescimento das tensões térmicas, oriundas dos gradientes de temperatura, e das tensões mecânicas potencializa o surgimento de trincas, como já discutido no tópico 2.3.2, o que explicaria a tendência verificada na dispersão de resultados. Em todos os avanços testados na primeira etapa, verificou-se também a formação de desgaste severo na forma de cratera ao longo das superfícies de saída, conforme mostra a **Figura 4-2**.

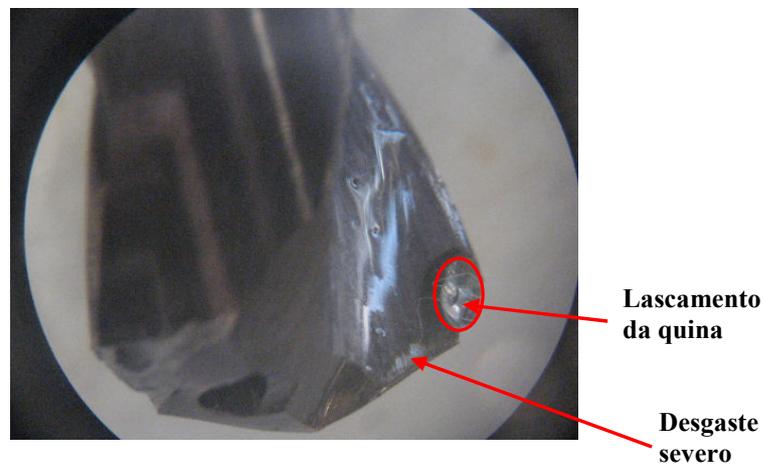


Figura 4-2 – Falhas no fim de vida de uma broca testada na condição 1.

Menores dispersões de vida são especialmente desejáveis em aplicações de produção seriada, por simplificar os procedimentos de controle do processo. Visto que o avanço de 0,22mm conferiu a menor dispersão nos resultados, adotou-se este valor como padrão para a próxima etapa dos ensaios. O resumo de todas as condições de corte empregadas na segunda etapa foi apresentado na **Tabela 3-3** e a única exceção de avanço se aplicou aos ensaios da condição 7, já comentada no tópico 3.6.

A **Tabela 4-1** apresenta os resultados de vida de ferramenta da segunda etapa de ensaios. Uma Análise de Variância (ANOVA) foi aplicada, com o objetivo de avaliar a significância estatística das diferenças verificadas entre as combinações de geometria, parâmetros, formas de aplicação de fluido de corte e revestimentos. As condições 2 e 3 foram excluídas da ANOVA, tendo sido usadas somente para a primeira etapa do estudo. Cada condição é denominada “Tratamento” na terminologia usualmente empregada para esse tipo de análise [58]. A **Tabela 4-2** apresenta um resumo dos coeficientes calculados na ANOVA. Como o fator F de Snedecor calculado é maior que o valor crítico tabelado para as condições

ensaiadas, pode-se afirmar, para o nível de significância escolhido (1% de probabilidade de erro), que há diferenças reais de desempenho entre as condições avaliadas.

Tabela 4-1 - Percurso total furado obtido nos ensaios da segunda etapa (valores em metros).

		Repetição 1	Repetição 2	Média	Amplitude
Condição 1	Geometria 1 (RT100U); jato; TiN+TiAlN multicamada (Firex®)	23,0	23,2	23,1	0,2
Condição 4	Geometria 1 (RT100U); MQFC; TiN+TiAlN multicamada (Firex®)	80,7	15,1	47,9	65,5
Condição 5	Geometria 1 (RT100U); MQFC; TiAlCN gradiente (AlboNiT®)	19,8	20,2	20,0	0,4
Condição 6	Geometria 1 (RT100U); MQFC; nc-TiAlN/a-Si3N4 nanocomposto (nACo®)	27,4	6,6	17,0	20,8
Condição 7	Geometria 2 (especial); MQFC; TiAlN+MoS ₂ multicamada (base Moliglyde®); 95 m/min e 0,24 mm	16,8	37,5	27,2	20,7
Condição 8	Geometria 3 (B256A - HPC); MQFC; TiN+TiAlN multicamada (KC7315®)	140,6	160,2	150,4	19,6
Condição 9	Geometria 3 (B256A - HPC); jato; TiN+TiAlN multicamada (KC7315®)	21,1	26,0	23,6	4,9

Tabela 4-2 - Coeficientes da ANOVA nos ensaios de furação da segunda etapa.

	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Fcalculado	Fcrítico (1%)
Tratamentos	6	27.549,41	4.591,57	11,55	7,19
Resíduo	7	2.781,98	397,43	-	-
Total	13	30.331,39	-	-	-

Feita a verificação inicial das evidências estatísticas, aplicou-se um teste de comparação de médias chamado teste de Tukey. Por ser considerado bastante conservador pela literatura no que diz respeito à discriminação das médias [58], utilizou-se um nível de significância de 5% na análise. Duas médias são consideradas diferentes pelo teste de Tukey quando a diferença entre elas excede um valor crítico calculado, chamado de “diferença mínima significativa” (d.m.s.). Quando a “d.m.s” for menor que o valor crítico, nada se pode afirmar. Quanto maior a dispersão, e menor for a amostragem, maior a incerteza a respeito das médias, o que acaba gerando uma “d.m.s” grande. Para obter o valor da “d.m.s”, utiliza-se o quadrado médio do resíduo (QMR) calculado na ANOVA conforme mostrado no Anexo 2. O

índice QMR é um indicativo da dispersão dos resultados. A **Tabela 4-3** compara algumas médias, duas a duas, usando a “d.m.s.” de Tukey.

Tabela 4-3 – Aplicação do teste de Tukey às médias de vida de brocas testadas.

	Diferença entre médias (m)	d.m.s. a 5% de Tukey (m)
Condição 4 em relação a 1	24,8	79,1
Condição 4 em relação a 5	27,9	
Condição 4 em relação a 6	30,9	
Condição 4 em relação a 7	20,8	
Condição 4 em relação a 8	102,5	
Condição 8 em relação a 9	126,8	

A comparação entre a condição 4 e 1 é visualizada no gráfico da **Figura 4-3**. A **Tabela 4-3** não comprova a superioridade da aplicação de MQFC em relação ao jato interno de fluido de corte na geometria RT100U, para o nível de significância estatístico escolhido. Entretanto, a **Figura 4-4** mostra uma menor danificação ao longo do gume principal em relação ao apresentado na **Figura 4-2**, exceto nas quinas, onde persistem lascamentos significativos na usinagem com MQFC. Assim, a falta de evidências de superioridade de MQFC na geometria RT100U pode simplesmente estar relacionada à pequena amostragem por condição, gerando uma “d.m.s” grande. Menores desgastes e maior vida média mostrada na **Figura 4-3** são indícios positivos em relação ao emprego de MQFC nesse tipo de broca. Por outro lado, em MQFC, observaram-se dispersões maiores de vida que na aplicação por jato interno de fluido de corte. Tal comportamento também foi identificado na furação da liga de titânio Ti6Al4V [4] e demanda um estudo mais aprofundado de suas causas.

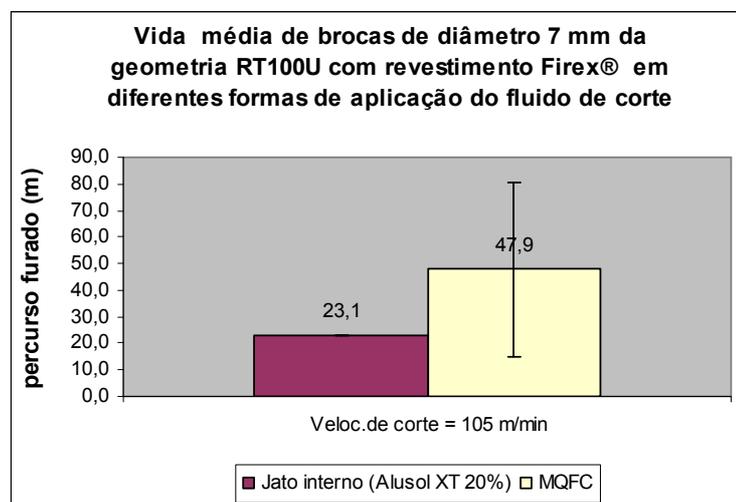


Figura 4-3 – Vida de brocas nas condições 1 e 4.

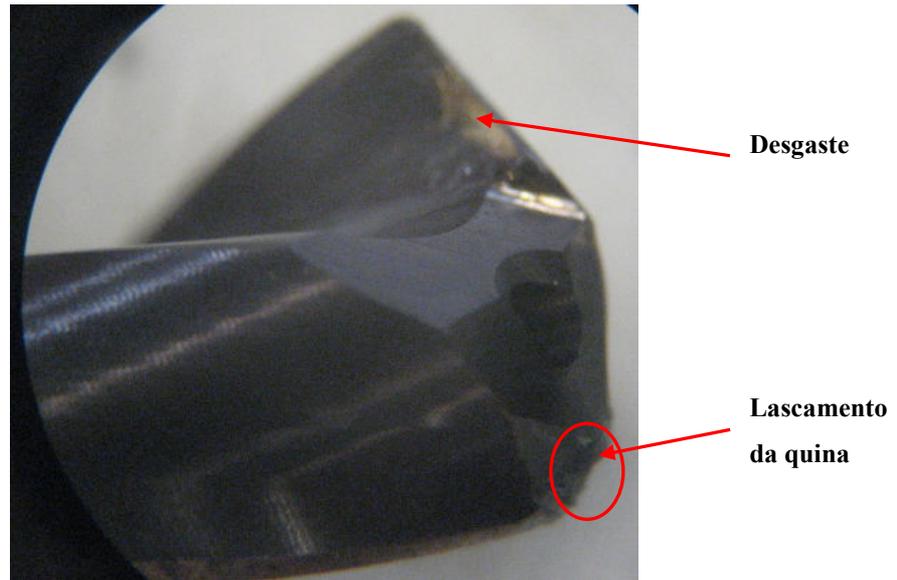


Figura 4-4 – Broca de geometria RT100U testada na condição 4 (MQFC).

As condições 5 e 6 dos ensaios empregam a geometria RT100U nas mesmas condições de corte e forma de aplicação de fluido de corte da condição 4 (MQFC), variando apenas os revestimentos aplicados. Na condição 5, utiliza-se o revestimento TiAlCN (AlboNiT®) de propriedades descritas na **Tabela 3-4** do capítulo 3. Um tipo de supernitreto, o nACo®, cujas propriedades também são descritas na **Tabela 3-4**, corresponde à condição 6. O nACo® consiste num tipo de TiAlN com elevado teor de alumínio na composição e estruturado numa matriz amorfa de Si_3N_4 . Sua dureza é quase 40% superior ao TiAlN usado na condição 4 (Firex®) e cerca de 65% maior que a do TiAlCN. Ensaio realizado por Tönshoff e Mohlfeld *apud* Miranda [25] verificaram que filmes de TiAlN começam a oxidar-se somente a 750°C com a proporção de 25% de alumínio para 75% de titânio e que essa temperatura de oxidação sobe para 830°C se a proporção de alumínio for aumentada para 60%. Ikeda e Satoh *apud* Miranda [25] afirmam que filmes de TiAlN em oxidação formaram misturas bifásicas de TiO_2 e Al_2O_3 a 1000°C no ar. É suposto que o aumento da resistência ao desgaste na usinagem sem fluido de corte é devido à formação de óxido de alumínio amorfo no topo dos revestimentos de TiAlN. Era esperado então que, nas condições de temperaturas mais elevadas envolvidas no emprego de MQFC, o melhor resultado da **Figura 4-5** ficasse por conta do supernitreto, seguido do TiN+TiAlN multicamada (Firex®) e, por fim o TiAlCN tipo gradiente (AlboNiT®), que apresenta a menor dureza. Isso se as brocas apresentassem mecanismos predominantes de desgaste por abrasão, difusão ou oxidação. Entretanto, a fragilidade das quinas da geometria RT100U tirou a vantagem do supernitreto. Embora, pelo teste de Tukey, não se tenha verificado uma diferença estatística significativa entre os três

revestimentos, para o intervalo de confiança escolhido, há indícios de que o Firex® apresenta vida média mais longa, seguido pelo AlboNiT® e por último o nACo®, como mostra a **Figura 4-5**. As barras de erros da figura mostram que, dentre os revestimentos avaliados, o AlboNiT® (TiAlCN) teve a menor dispersão de resultados, sendo justamente o revestimento que apresenta melhores características de adesão e de tenacidade segundo o prestador do serviço de revestimento [59].

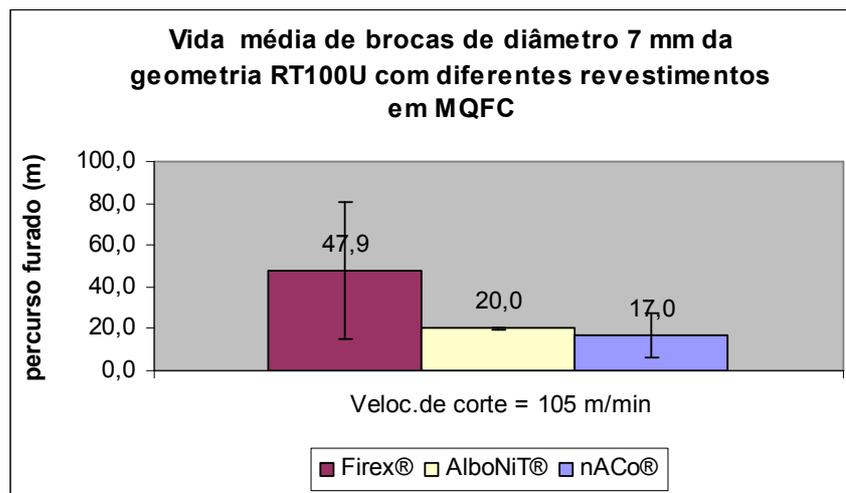


Figura 4-5 – Vida de brocas nas condições 4, 5 e 6.

A razão para uma vida média tão baixa do revestimento nanocomposto nACo® não foi determinada, porém acredita-se que esteja relacionada a alguma de suas propriedades em contraste com a condição de tensões residuais internas nas imediações das quinas. Segundo Gey [60], a formação de trincas é potencializada em revestimentos de TiAlN com alto teor de alumínio, em comparação com revestimentos convencionais de TiAlN. Os grandes gradientes de composição existentes em pequenas espessuras de revestimento PVD geram tensões internas elevadas, tipicamente da ordem de alguns GPa [61]. Além disso, como seus cristais se formam geralmente na direção ortogonal à superfície do substrato [62], gumes afiados se tornam regiões de formação instável por sua transição brusca na direção de crescimento dos cristais do revestimento. Assim, o revestimento nas imediações do gume acaba sujeito a tensões internas ainda maiores que nas superfícies de saída ou de folga, propiciando a formação de trincas que, por sua vez, resultam em deslocamentos pouco depois do início do corte, exatamente na região onde usualmente se medem os desgastes [19]. Uma boa preparação de gume é aquela que reforça os gumes cortantes assegurando uma transição suave do revestimento entre o flanco e a superfície de saída, reduzindo assim as tensões internas,

mas sem deixar os gumes “cegos”. A preparação deve ser feita antes do revestimento, do contrário o desempenho do mesmo é prejudicado pela remoção localizada que reduz o isolamento térmico e químico, facilitando o contato direto da peça com o substrato. Alguns pesquisadores [19] discutiram a influência de arredondamentos nas quinas em ensaios de furação a seco do aço para trabalho a frio X155CrVMo12-1. Foram feitos furos cegos com brocas de metal-duro revestidas com nACo®, diâmetro 5mm, velocidade de corte de 75m/min, avanço por faca de 0,15mm e profundidade de 15mm. Quatro preparações de gumes foram feitas: gume somente retificado (vivo) e três diferentes raios de arredondamento de gume: 11 μ m, 15 μ m e 21 μ m. A **Figura 4-6** mostra que o melhor resultado foi obtido com brocas de raio de 15 μ m para essa aplicação. O exemplo reforça a tese da importância da preparação de gume no desempenho das ferramentas revestidas.

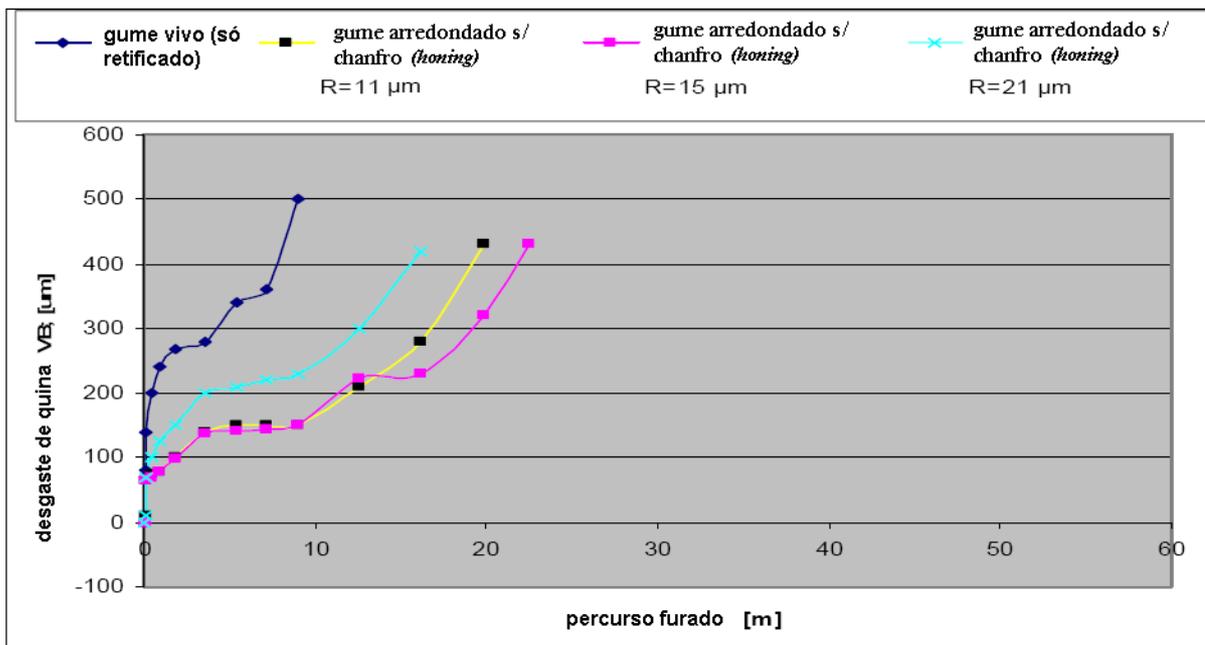


Figura 4-6 – Vida de brocas com e sem preparação de gume [19].

Kammermeier [14] comparou vários revestimentos para furação em aço Ck45 (similar ao ABNT 1045) de um furo de 6,8mm de diâmetro, em velocidade de corte de 80m/min, avanço de 0,15mm e 30mm de profundidade. O melhor resultado foi obtido com uma composição otimizada de TiAlN, como mostra a **Figura 4-7**. Heineman *et alli* [52] também indicaram o revestimento TiAlN na furação profunda (dez vezes o diâmetro) de aço não ligado com 0,45% carbono como a melhor opção testada em seu estudo, justamente por suas propriedades refratárias.

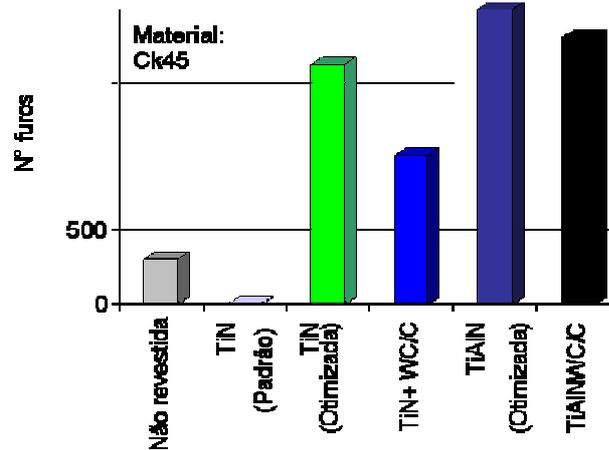


Figura 4-7 – Vida de brocas com diferentes revestimentos para furação em aço Ck 45 [14].

Na Geometria B256A - HPC (Geometria 3), o principal diferencial, além do gume transversal tipo “S”, diz respeito à proteção das quinas com um significativo *honing* (**Figura 4-8** à direita). No lado esquerdo da **Figura 4-8** visualiza-se uma quina de broca nova somente retificada, sem preparação por arredondamento ou *honing*. A presença do *honing* reforçado nas quinas da geometria B256A - HPC contribui para evitar a nucleação de trincas nesta região de transição de superfícies. Ao colocar em teste as brocas da geometria B256A - HPC empregando MQFC (condição 8), identificaram-se desgastes em forma de sulcos equidistantes das guias, como evidenciado na **Figura 4-9**. A distância entre os sulcos se aproxima do avanço empregado, de acordo com medições realizadas através do microscópio e *software* analisador de imagens. Marcas sutis desse tipo de desgaste também foram observadas no início do percurso furado com a geometria RT100U, porém, pela falta de resistência das quinas, as brocas logo apresentavam lascamentos. Portanto, a geometria B256A - HPC confere o melhor desempenho para MQFC dentre as alternativas avaliadas, com significância estatística comprovada através do teste de Tukey.

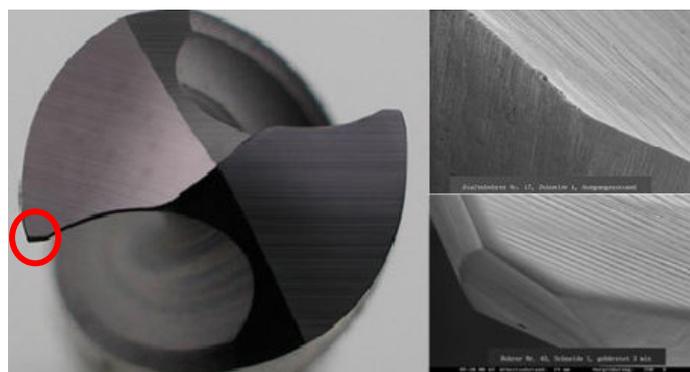


Figura 4-8 – Quina de broca sem *honing* (acima) e com *honing* (abaixo) [19].

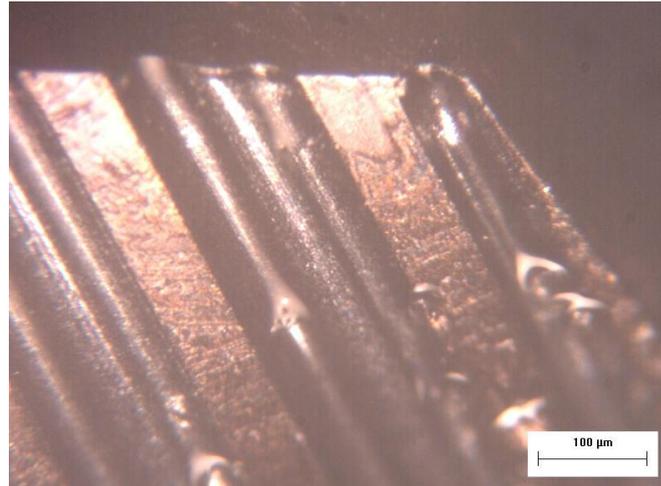


Figura 4-9 - Desgaste nas guias de broca com geometria B256A - HPC após 160,2m furados em MQFC.

A mesma comparação anteriormente discutida entre MQFC e jato interno para a geometria RT100U foi repetida na geometria B256A - HPC (condições 8 e 9) com os parâmetros de corte pré-fixados. Conforme mostra a **Figura 4-10**, mesmo o *honing* reforçado da Geometria B256A - HPC não impede os lascamentos das quinas na furação com jato de fluido de corte, o que reforça a tese de que as tensões de origem térmica aumentam com o emprego de jato de fluido de corte, incrementando a incidência de trincas que antecipam a falha das ferramentas. Para a operação de usinagem estudada, comprovou-se a superioridade da aplicação de MQFC, porque a diferença entre médias é bem superior à “d.m.s” da **Tabela 4-3**. A **Figura 4-11** mostra o significativo impacto que a alteração da forma de aplicação de fluido de corte trouxe à vida média observada.

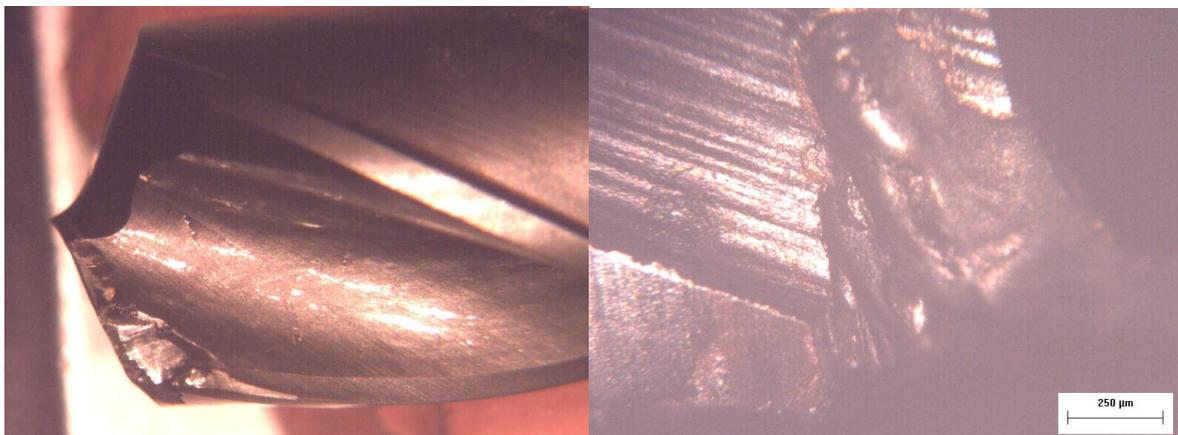


Figura 4-10 – Lascamento em broca de geometria B256A - HPC com refrigeração por jato interno após furar 21,1 metros (Condição 9)

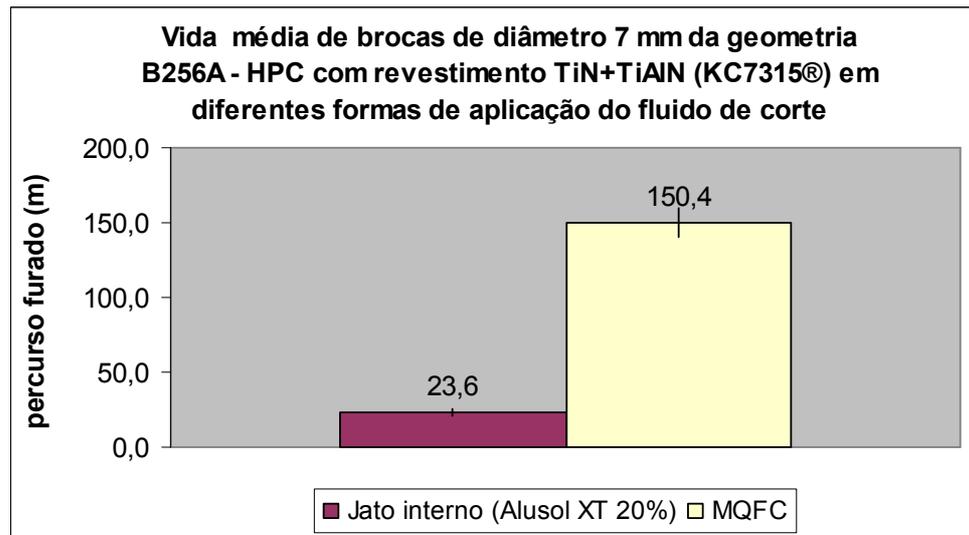


Figura 4-11 – Vida de brocas nas condições 8 e 9.

A superioridade de MQFC em relação ao jato de fluido de corte foi também verificada em outros trabalhos da literatura. Weingaertner *et alli* [63] avaliaram brocas helicoidais de aço-rápido com TiN e TiN+MoS₂ para furar aço ABNT 1040 em três formas de aplicação de fluido de corte: jato externo de uma emulsão, MQFC e a seco. O desgaste de flanco foi maior com a emulsão desde o começo, o que segundo os autores, pode estar associado a choques térmicos gerados na operação. As marcas de desgaste com MQFC foram aproximadamente duas vezes menores que na usinagem a seco e três vezes em relação ao jato de emulsão. Kammemeier [14] verificou desgaste menor e mais uniforme, sem danificação do gume transversal, usando MQFC em testes de furação de aço 50CrV4. A broca tinha 11,8 mm de diâmetro, a velocidade de corte era de 80 m/min, o avanço de 0,25 mm e a profundidade de corte de 30 mm.

Por um lado, a capacidade de refrigeração em MQFC é muito baixa, o que justificaria o prolongamento da vida média pela diminuição dos gradientes térmicos no gume principal. Por outro lado, os mecanismos de desgaste ligados à temperatura na região de corte tendem a se agravar, se a eficiência de lubrificação na região de corte e nas guias for baixa. Hann *et alli* [64] afirmam que o fluido de corte, mesmo em pequenas quantidades, penetra e lubrifica as guias da broca, reduzindo o atrito. O fato de filmes lubrificantes finos serem mais eficazes na redução do atrito que filmes espessos (*vide* discussão sobre regimes de lubrificação no tópico 2.1.1), pode ser um dos fatores que beneficia o desempenho da lubrificação em MQFC em relação ao jato de fluido de corte. Além disso, as propriedades inerentes aos fluidos para MQFC costumam ser melhores em termos de capacidade de lubrificação que a de fluidos

miscíveis em água, pelo fato de empregarem na formulação matérias-primas nobres de bom poder lubrificante. O aumento no custo da formulação é compensado pelas mínimas quantidades utilizadas no processo.

Outros fenômenos podem ter influência secundária na maior eficiência de MQFC. Min *et alli* [65] analisaram a influência de gases circundantes na usinagem sem fluidos líquidos e concluiu que o oxigênio possui certa capacidade de adsorção à nova superfície gerada durante o corte formando uma camada óxida que reduz o atrito. Assim, o ar comprimido pode ter uma pequena contribuição benéfica ao processo além de simplesmente remover os cavacos dos canais da ferramenta. Wakabayashi *et alli* [66] avaliaram diferentes fluidos para MQFC e concluíram que alguns possuem melhor capacidade de adsorção às novas superfícies geradas pelo corte e que essa adsorção é potencializada pela presença de oxigênio.

Craterizações moderadas ocorreram no alívio de núcleo da broca, afastadas do gume principal das brocas de geometria B256A - HPC empregando MQFC (**Figura 4-12**). Isso indica que, nessa região da broca, mecanismos de desgaste ligados à temperatura, como oxidação e difusão passaram a ter maior relevância uma vez que o obstáculo inicial da resistência das quinas foi superado e se incrementou o tempo que a ferramenta atuou sob temperatura elevada.

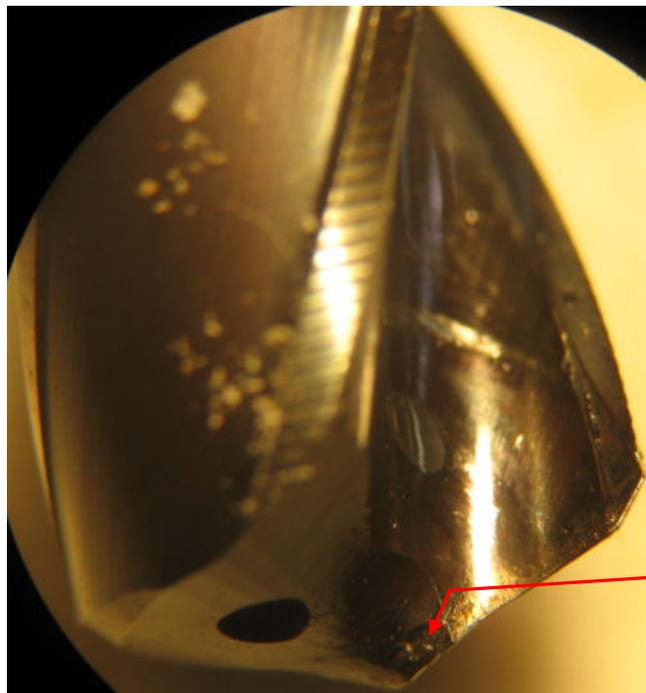


Figura 4-12 - Craterização de uma broca de geometria B256A - HPC testada na condição 8 (em MQFC) após 160,2 metros furados.

O fabricante Guhring desenvolveu uma broca específica para os ensaios de MQFC. Dentre as características diferenciais estão: menor guia da broca, conicidade no diâmetro da broca maior que o usual para diminuir o atrito nas guias e canais de extração de cavacos maiores. O revestimento multicamada, que emprega o Moliglyde® (MoS_2), incorpora um lubrificante sólido para redução de atrito ao substrato de TiAlN similar ao Firex®. Doravante, essa concepção de ferramenta será denominada simplesmente de geometria 2 no presente trabalho. De acordo com a **Figura 4-13**, a geometria 2 apresentou a menor vida média entre as alternativas avaliadas em função dos lascamentos precoces nas imediações das quinas (**Figura 4-14**). A redução no diâmetro do núcleo aumenta os canais de extração de cavacos, mas diminui a rigidez da broca de geometria 2, não propiciando o ganho de desempenho desejado.

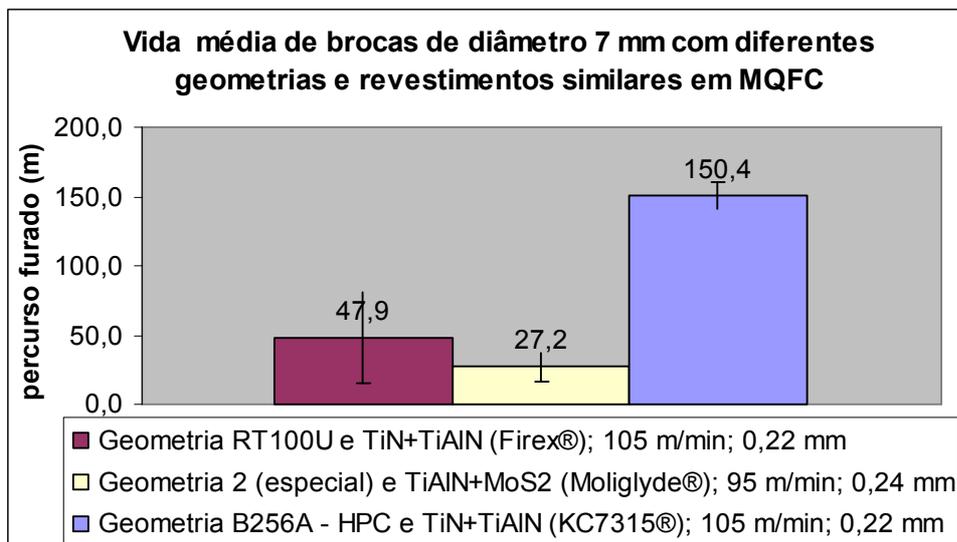


Figura 4-13 – Vida de diferentes geometrias de brocas nas condições 4, 7 e 8.

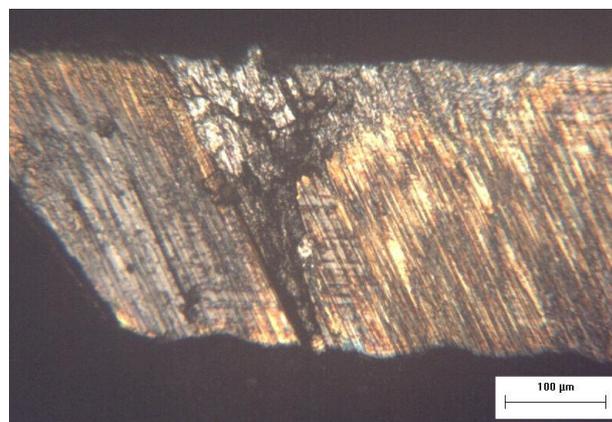


Figura 4-14 - Desgaste e lascamentos nas guias de broca de geometria 2 (Condição 7).

A craterização na superfície de saída do gume principal foi discreta, como mostra a **Figura 4-15**.

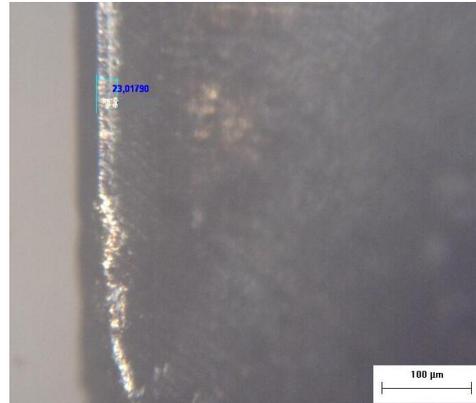


Figura 4-15 - Craterização com largura de $23\mu\text{m}$ junto ao gume principal no fim de vida de uma broca com geometria 2 (MQFC).

Em vista do exposto, conclui-se que geometria B256A - HPC é a que melhor alia características geométricas para a operação estudada. Como etapa complementar de verificação do comportamento das duas formas de aplicação de fluidos de corte estudadas (jato interno e MQFC interno), dois ensaios descritos na **Tabela 3-5** comparam a vida de brocas de geometria B256A - HPC no diâmetro 8,7 mm. A **Figura 4-16**, onde se encontram os resultados, segue a mesma tendência obtida na **Figura 4-11** para brocas de diâmetro 7 mm com a geometria B256A – HPC, o que só vem a confirmar a vantagem de MQFC em relação ao jato interno de fluido de corte no que diz respeito à vida de ferramenta.

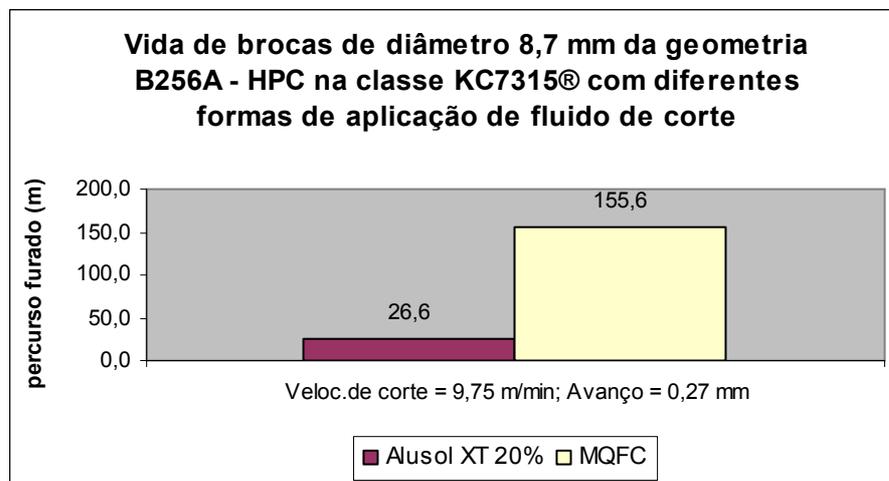


Figura 4-16 - Etapa de verificação de vida de brocas com diâmetro 8,7 mm.

A eliminação completa do fluido não é recomendada, pois apresenta histórico de desempenho inferior ao de MQFC na literatura. Kammemeier [14] obteve um desempenho cinco vezes superior ao da usinagem a seco empregando 8ml/h de MQFC a 3bar em furação de aço 50CrV4, além de apresentar diferença expressiva no torque de furação a partir de 20mm de profundidade. Momper *apud* Macagnani [67] obteve desempenho 7,5 vezes maior com MQL furando aço 50 CrV4 com brocas de metal duro de 11,8mm de diâmetro revestidas com TiN. Para materiais não ferrosos, Braga *apud* Macagnani [67] sequer conseguiu concluir os ensaios a seco em uma liga de alumínio-silício 7% SAE-323, pois a furação sem fluido de corte apresentou entupimento dos canais helicoidais da broca pela adesão do material. Até mesmo em furação profunda (36 vezes o diâmetro) de ferro fundido GG26 Cr, Weinert [49] teve resultado inferior injetando somente ar comprimido por dentro da broca do que com a adição de MQFC. Heineman *et alli* [52] avaliaram a furação profunda (dez vezes o diâmetro) com brocas de 1,5mm de diâmetro em aço rápido com e sem revestimento (TiN e TiAlN) e estudaram a influência de fornecimento contínuo ou interrompido de MQFC externa no desempenho da broca. Nos ensaios com interrupção, o MQFC fornecido a 18ml/h era desligado após 5mm furados (cerca de 3 vezes o diâmetro). As ferramentas revestidas com TiN e TiAlN apresentaram maior vida com fornecimento contínuo, indicando que uma pequena parcela de fluido de corte é capaz de penetrar, mesmo em condições desfavoráveis de profundidade de corte.

A convergência de conclusões em todos esses trabalhos aponta vantagens no emprego de MQFC, pelo menos nos materiais citados. A lubrificação, mesmo em mínimas quantidades, apresentou efeitos comprovadamente benéficos, aliada ao fato de que a alimentação interna ou externa de jato de fluido de corte é, via de regra, deficiente em uniformizar as temperaturas na região de corte de brocas helicoidais, acabando por ter um efeito mais nocivo do que benéfico do ponto de vista da durabilidade das ferramentas.

4.2. ENSAIOS DE VIDA EM ROSQUEAMENTO INTERNO

Conforme discutido no capítulo 3, os ensaios de rosqueamento foram subdivididos em duas etapas, onde a etapa preliminar compara a vida de ferramentas para algumas geometrias de ferramenta e velocidades de corte, empregando MQFC interno ou jato interno de fluido de corte. De maneira geral, empregaram-se amostras unitárias para conferir rapidez ao processo de análise e seleção das melhores combinações de variáveis e foi avaliada também a questão

do controle de cavacos na operação. A **Figura 4-17** apresenta os resultados de vida de machos nas três primeiras condições da **Tabela 3-6** do capítulo 3, que resume os parâmetros e geometrias empregados nesta etapa. No único ensaio com amostragem de cinco ferramentas, percebe-se uma considerável dispersão dos resultados (+/-16,2m de amplitude). As comparações de desempenho apresentadas nesta etapa são apenas indícios de tendências, usadas para reduzir o número de ensaios da etapa seguinte.

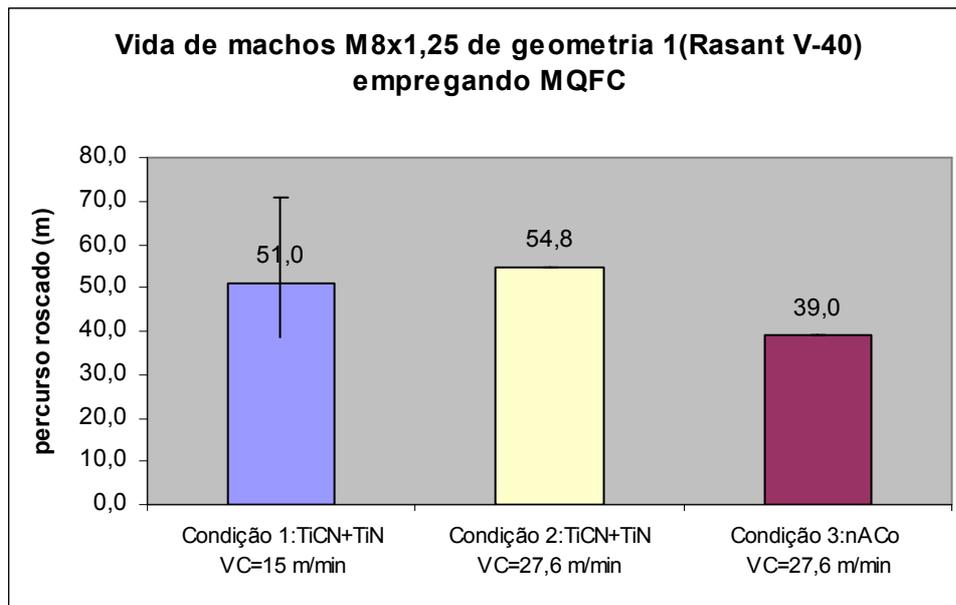


Figura 4-17 – Vida de machos testados nas condições 1 a 3 da etapa preliminar.

O aumento da velocidade de corte de 15m/min para 27,6m/min na geometria Rasant V-40 parece não implicar em redução do desempenho do macho. De fato, depois que já se tinha realizado os ensaios, verificou-se que o fabricante da ferramenta indica velocidades acima de 20m/min para trabalhar em aço ABNT 1045 com essa geometria de macho. A alteração do revestimento multicamada TiCN e TiN para um supernitreto (o nACo®) na mesma geometria e velocidade de corte não apresentou o incremento esperado no desempenho. Conforme discutido no tópico 2.7, o rosqueamento interno com machos de corte se caracteriza por tensões de tração elevadas atuando sobre cada um dos filetes quando há poucos deles na parte cônica da ferramenta. As geometrias de ferramentas adotadas neste trabalho possuem apenas de 2 a 3 filetes para cada um dos três canais, o que confere uma entrada bastante agressiva à ferramenta. A remoção dos cavacos da região de corte é crítica, podendo gerar sobrecarga da ferramenta se a extração não ocorrer de maneira adequada. Soma-se a isto o fato de que os revestimentos aplicados sobre geometrias complexas, como os

filetes de rosca, apresentam maiores gradientes de tensão interna [19]. Em alguns lotes, percebe-se uma deficiência na formação dos cavacos, que se enroscaram em torno da ferramenta. Também há que se considerar que a velocidade de corte é reduzida em relação a outros processos de usinagem. Assim, acredita-se que todos esses fatores pesaram negativamente contra o supernitreto e favoreceram o revestimento mais tenaz, de melhor adesão e com dureza intermediária, que é o TiCN e TiN multicamada.

A **Figura 4-18** mostra falhas em um macho da condição 1 após atingir o critério de fim de vida estabelecido. Em outras palavras, o dimensional da rosca se alterou a ponto de impedir a entrada do calibrador tipo “passa – não passa” especificado. Percebem-se sinais de adesão de material na superfície de saída de um filete de entrada do macho (à direita da figura) e avarias que comprometeram o formato deste. Falhas semelhantes foram observadas na maioria dos machos testados. Há também sinais de desgaste nas laterais dos filetes de entrada (à esquerda da **Figura 4-18**).

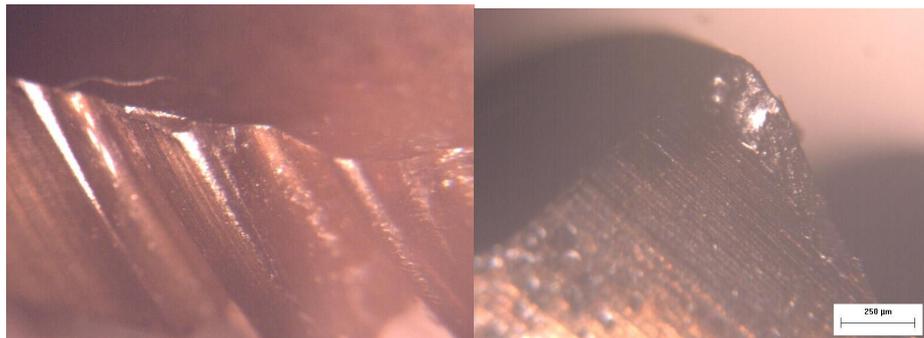


Figura 4-18 - Falhas em macho de geometria V-40, com TiCN e TiN, empregando MQFC.

As ferramentas de geometria Rasant V-40 e Rasant V-Dry são muito semelhantes geometricamente e utilizam os mesmos revestimentos, tendo apresentado desempenhos compatíveis na velocidade de corte de 15 m/min, como mostra a **Figura 4-19**. A geometria 2 também apresentou problemas de controle de cavacos em MQFC, forçando paradas de produção para remoção dos cavacos emaranhados. A dificuldade de controle de cavacos em MQFC foi discutida no capítulo 2, e a literatura sugere que a redução da espessura do cavaco pelo amolecimento do material e pela ausência do meio líquido como auxiliador no arraste dos cavacos para fora da região de corte são os causadores dessa deficiência [14]. Entretanto, a relevância da forma de aplicação de fluido de corte no controle de cavacos para esta operação específica de usinagem será discutida adiante, com base nas evidências dos resultados dos ensaios. O ensaio de rosqueamento com macho M10x1,5 na condição 5

apresentou desempenho reduzido pelo colapso catastrófico do macho. Conforme mostra a **Figura 4-19**, o desempenho foi significativamente inferior ao esperado. Uma massa de cavacos emaranhados em torno do macho motivou esse colapso. Isso leva a crer que, tanto o ensaio na condição 5, como a variabilidade de desempenho observada nas cinco amostras da condição 1 podem ter relação com a deficiência na extração de cavacos. Buscou-se melhorar a saída dos cavacos na condição 6, aumentando a velocidade de corte. O resultado do ponto de vista de desempenho não mostrou ganho significativo e a dificuldade de extração de cavacos permaneceu.

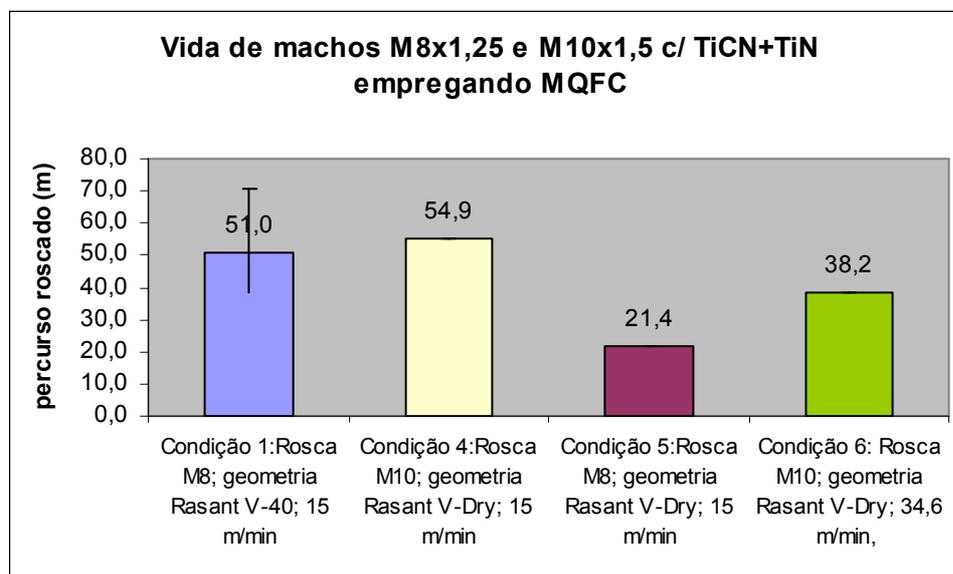


Figura 4-19 – Vida de machos testados nas condições 1 e 4 a 6 da etapa preliminar.

As condições 7 e 8 são avaliações da geometria 2 com jato de fluido de corte nas roscas M8x1,25 e M10x1,5. Embora não se possa afirmar com absoluta certeza, *a priori*, não se percebem diferenças tão expressivas de desempenho em relação a MQFC, como mostra a **Figura 4-20**. A influência do controle de cavacos parece bem mais importante. Evidência disso é que o rosqueamento com macho M10x1,5 testado na condição 8 apresentou a menor vida por causa da quebra precoce com cavacos emaranhados em torno do macho, mesmo com jato de fluido de corte. O problema aconteceu também na rosca M8x1,25 (condição 7), porém não chegou a implicar na quebra da ferramenta. O fato de que há deficiências no controle de cavacos na condição de jato descartou a hipótese de que o problema esteja associado exclusivamente à adoção de MQFC. O fator dominante deve, portanto, ser a própria geometria dos filetes na formação do cavaco e não o maior aquecimento dos cavacos ou

deficiência no arraste. Levando em consideração esta conclusão, buscou-se uma terceira geometria de machos, a geometria BP70, onde efetivamente se conseguiu o controle desejado na formação de cavacos no teste da condição 9. A aparente redução de desempenho não pode ser comprovada estatisticamente, entretanto, a questão do controle de cavaco é primordial para a estabilidade de um processo em escala de produção industrial. Assim, descartaram-se as geometrias anteriores para a fase seguinte dos ensaios.

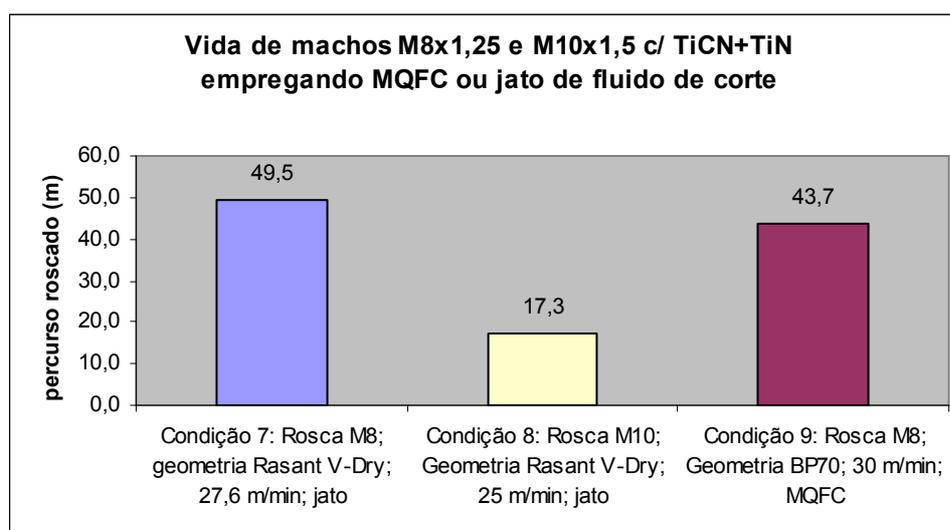


Figura 4-20 – Vida de machos testados nas condições 7 a 9 da etapa preliminar.

Uma vez definida a geometria BP70 como a mais adequada para o processo em questão, adotou-se a velocidade de maior produtividade (34,6m/min) para a próxima etapa de ensaios em MQFC. O experimento proposto foi detalhado no capítulo 3, sendo resumido na **Tabela 3-7**. As condições A2B1 e A2B2 da referida correspondem ao processo adequado à MQFC, enquanto que o processo pré-existente é representado pelas condições A1B1 e A1B2.

A **Tabela 4-4** mostra os coeficientes da ANOVA realizada sobre o experimento fatorial, cujo cálculo é detalhado em anexo. A estruturação na forma de experimento fatorial tanto permite verificar estatisticamente se o processo adequado a MQFC é melhor que o pré-existente, como permite avaliar se há uma mudança de comportamento entre as roscas M8x1,25 e M10x1,5. Para o fator A, o valor de “ $F_{\text{calculado}}$ ” é muito superior ao valor crítico, mesmo considerando um nível de significância bastante conservador (1% de probabilidade de erro na afirmação). Considerando que o percurso médio de rosqueamento no processo proposto é de 48,8m contra apenas 15,7m no processo pré-existente, fica comprovada a superioridade do processo adequado à MQFC em relação ao pré-existente do ponto de vista

da vida de ferramentas. Por outro lado, as dimensões de roscas avaliadas não apresentam qualquer relação com o desempenho de um processo ou outro, o que é evidenciado pelo valor quase nulo de “ $F_{\text{calculado}}$ ” no fator B. Em alguns experimentos fatoriais, verifica-se que o valor de um fator interfere no desempenho de outro e isso é chamado de “Interação” [58]. O fator AxB é a interação entre os dois fatores e verifica-se que seu “ $F_{\text{calculado}}$ ” é nulo, ou seja, não existe interação entre os fatores escolhidos para análise.

Tabela 4-4 - Coeficientes da ANOVA do experimento fatorial de rosqueamento.

	Graus Liberdade	Soma Quadrados	Quadrado Médio	Fcalculado	Fcritico (5%)	Fcritico (1%)
S.Quadrados A	1	2184,41	2184,41	110,96	7,71	21,2
S.Quadrados B	1	8,17	8,17	0,42	7,71	21,2
S.Quadrados AxB	1	0,06	0,06	0,00	7,71	21,2
Tratamentos	3	2192,64	730,88	37,13	6,59	16,7
Resíduo	4	78,75	19,69			
Total	7	2271,39	324,48			

4.3. CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES SOBRE OS ENSAIOS

Embora a comparação entre as duas formas de aplicação de fluido de corte no rosqueamento com a geometria BP70 não tenha comprovado diferenças estatísticas de vida pela pequena amostragem na etapa preliminar, os ganhos obtidos com o emprego de MQFC na operação de furação já viabiliza economicamente a implantação de MQFC na etapa selecionada do processo de fabricação de eixos. Um levantamento do consumo de fluido de corte para aplicação por jato ao longo de três anos foi confrontado com o consumo médio em seis meses de utilização do fluido para MQFC. Os dados mostraram que, mesmo com o preço por litro bastante superior do fluido para MQFC, a completa eliminação do fluido para aplicação por jato representa cerca de 90% de redução nos custos de aquisição de fluido de corte para a aplicação. Como o centro de usinagem já dispunha de enclausuramento e sistema de exaustão de névoa, o investimento se restringiu à aquisição do equipamento gerador de *spray*. O custo de aquisição do equipamento gerador de *spray* é inferior a de uma bomba de alta pressão para refrigeração por jato interno e o retorno de investimento se deu em cerca de meio ano, considerando apenas os ganhos com ferramental e tempo de usinagem. Outro benefício periférico do emprego de MQFC no rosqueamento foi a eliminação de uma operação posterior de limpeza das roscas com ar comprimido.

As melhores ferramentas e parâmetros de corte propostos neste trabalho para MQFC interna foram implantados em dois centros de usinagem iguais que realizam a usinagem de furos e roscas nas extremidades de eixos. A completa eliminação da refrigeração por jato ainda não é possível nessa etapa de fabricação dos eixos em virtude da existência de uma pequena parcela de eixos especiais com roscas muito pequenas para passagem interna do fluido de corte ou eixos fabricados em diferentes aços inoxidáveis.

Não foram relatados casos de doenças ocupacionais associados ao emprego de MQFC ao longo do período de utilização deste na planta industrial onde o trabalho foi desenvolvido. O início da utilização do equipamento gerador de MQFC interna se deu em 2007, porém a empresa já utiliza equipamentos de geração externa de MQFC desde 2005 em outras etapas do processo de fabricação. No que se refere à contaminação do ambiente de trabalho, o fornecedor do equipamento gerador de *spray* assegura, através de ensaios próprios, que as características de emissão de névoa do equipamento se adéquam à legislação ambiental e de saúde ocupacional alemã e à normativa BGI 718 [43], desde que a pressão de trabalho e o fluido de corte utilizado sigam suas especificações. A seleção dos fluidos de corte não somente seguiram as indicações do fabricante do equipamento, mas tiveram suas especificações de segurança (disponíveis na Ficha de Informações de Segurança do Produto Químico) verificadas internamente, em conformidade com exigências reguladas pela certificação ISO 14000 da empresa onde se realizou o trabalho.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

Como já mencionado, a deficiência na rigidez de legislações ambientais e sociais no Brasil e o pouco conhecimento que se tem na indústria sobre alternativas ambientalmente mais amigáveis refletem na ainda tímida aplicação de MQFC no parque industrial brasileiro. Soma-se a isso a escassez de publicações relacionadas aos processos de furação e rosqueamento com machos de corte, deixados em segundo plano diante de processos como torneamento e fresamento, apesar de sua importância econômica e tecnológica dentro da indústria. As conclusões positivas dos ensaios de furação e rosqueamento interno com machos de corte em MQFC no presente trabalho servem de estímulo às indústrias brasileiras e às instituições de ensino no intuito de avaliarem conjuntamente outras aplicações de MQFC.

O emprego de MQFC em furação e rosqueamento mostrou que não só é tecnicamente possível, como apresenta vantagens em relação ao jato de fluido convencional para a aplicação estudada. Vidas de ferramentas significativamente maiores ou, no mínimo, semelhantes, excelente produtividade e nenhum prejuízo relevante à qualidade dos componentes fabricados em série, com as vantagens da redução do consumo de água e fluido de corte, além dos ganhos ambientais. Isto desde que os parâmetros de entrada do processo, incluindo a especificação do ferramental, parâmetros de usinagem, forma de alimentação e fluido de corte estejam adequados. Embora o presente texto não tenha se detido aos aspectos econômicos, num contexto mais amplo, o projeto da empresa onde os ensaios foram desenvolvidos contemplou a questão econômica e demonstrou reduções de custos associados ao ferramental, à utilização das máquinas-ferramentas e à aquisição de fluidos de corte.

Ainda de encontro aos objetivos do trabalho, a confrontação da aplicação industrial com o estado da arte indicado em trabalhos de outros pesquisadores acerca do aperfeiçoamento de materiais, revestimentos, geometria para brocas e machos de corte, geradores de *spray* e fluidos de corte aplicados em MQFC mostraram coincidências e discrepâncias interessantes nas conclusões. Em teoria, a redução do atrito nas paredes do furo pelo emprego de guias mais estreitas e conicidade inversa do diâmetro da broca

ampliada prolongaria a vida de brocas em MQFC. Semelhantemente, a literatura afirma que o aumento do volume disponível nos canais de extração de cavacos facilita a remoção destes da região de corte, provoca menos atrito e menor aquecimento, beneficiando a vida de brocas helicoidais em MQFC. Entretanto, para a aplicação em questão, as alterações não foram positivas para a vida das brocas (representadas na geometria 2) empregando MQFC, como era esperado. O fenômeno de lascamento se agravou, provavelmente em função da menor rigidez oriunda da redução no diâmetro do núcleo da broca e a condição desfavorável de entrada na extremidade dos eixos pela presença do furo de centro. Normalmente em ensaios empregando corpos-de-prova, essa condição de entrada seria evitada pela introdução de uma pré-usinagem que garantisse uma condição mais favorável para as ferramentas. Entretanto, o trabalho foi desenvolvido na indústria, com componentes reais e sem a possibilidade de justificar aumento nos tempos de ciclo pela introdução de operações intermediárias.

Com exceção da geometria B256A - HPC (geometria 3) em MQFC, todas as demais ferramentas apresentaram falha por lascamento nas quinas. Na geometria RT100U (geometria 1), onde se concentrou a maior parte dos testes, percebeu-se uma aparente relação entre o avanço e os lascamentos das brocas. Quanto maior o avanço, maior a dispersão das vidas obtidas, provavelmente em função da incidência aleatória de lascamentos. A presença da superfície inclinada do furo de centro de entrada deve ter contribuído para a desestabilização das forças de corte atuantes sobre as brocas. O diferencial da geometria 3, além da redução da força axial em função da geometria em forma de “S” do gume transversal, reside na proteção das quinas com um *honing* reforçado. Ensaios empregando essa geometria em MQFC proporcionaram excelente resistência ao lascamento, sendo que o critério de fim de vida foi atingido em valores médios significativamente superiores de percurso de furação. Ao invés das lascas, surgiram sulcos equidistantes nas guias com intervalos praticamente coincidentes com o valor de avanço e verificou-se também alguma craterização no início dos canais da broca, próximo ao gume transversal, resultado da ação prolongada de mecanismos de desgaste ligados à altas temperaturas, como difusão e oxidação. Assim, pode-se dizer que as questões relacionadas ao aperfeiçoamento da geometria de gume transversal e proteção de quinas com raios ou *honings* no lugar de superfícies simplesmente retificadas tiveram excelente concordância entre os resultados da literatura comparando à aplicação estudada.

Revestimentos PVD superduros, como o nACo® (supernitreto TiAlN nanocomposto) teoricamente incrementam a resistência ao desgaste nas condições de maior atrito e temperatura promovidas por MQFC quando comparados a revestimentos tradicionalmente usados na indústria, como o TiAlN PVD multicamada. Entretanto, o emprego de um revestimento TiAlN de altíssima dureza (4300 HV), propriedade proporcionada por seus cristais nanométricos com alto teor de alumínio envoltos numa matriz amorfa de Si_3N_4 , não proporcionou o incremento de desempenho mencionado na literatura. Pelo contrário, a amostragem utilizada, ainda que pequena para uma conclusão definitiva, indica que há maior incidência de trincas nas quinas da ferramenta, reduzindo a vida das brocas ensaiadas nessa condição. Embora a razão não tenha sido esclarecida, acredita-se que a região de transição abrupta entre superfícies que compõem as quinas agravem as tensões internas no revestimento, que por sua vez, já possui maior tendência à nucleação de trincas que os revestimentos à base de TiAlN com menores teores de alumínio. Assim, na medida em que a ferramenta é submetida às solicitações de trabalho, o relaxamento das tensões resulta em deslocamento exatamente na região de maior solicitação. A menor dispersão de resultados ocorreu com o revestimento de maior tenacidade e menor dureza, composto de TiAlCN, sendo mais um indicativo de que a manutenção da integridade do revestimento nessa região é crítica do ponto de vista da nucleação aleatória das trincas. O resultado mais favorável em termos de vida média de brocas para os revestimentos testados foi obtido com um TiN+TiAlN multicamada, que é uma combinação intermediária de dureza e tenacidade.

Alguns pesquisadores afirmam que as brocas helicoidais com MQFC tendem a apresentar menor incidência de avarias que com jato de fluido de corte em função da menor oscilação térmica atuando sobre a ferramenta. De fato, verificou-se menor incidência de lascamentos nas brocas que empregam MQFC em relação ao jato interno de fluido de corte. O incremento de vida média ficou estatisticamente comprovado na geometria 3, havendo também bons indícios de melhora na geometria 1. Os gradientes de temperatura na broca acabam sendo reduzidos pelo emprego de MQFC, o que é uma das principais motivações da melhora na vida média das ferramentas. Outras causas secundárias podem ter contribuído para a redução do atrito nas guias e o conseqüente aumento na durabilidade das brocas. O regime de lubrificação com uma fina camada de lubrificante dissipa menos calor por atrito viscoso que camadas espessas, as propriedades lubrificantes dos ésteres sintéticos usados nos experimentos com MQFC são superiores às do fluido emulsionável, e a presença do ar comprimido tem algum

efeito benéfico, não somente na remoção dos cavacos para evitar aquecimento e entupimento por cavacos, mas também na formação de filmes óxidos de efeito lubrificante entre a peça e ferramenta e na adsorção do fluido de corte às superfícies. Por outro lado, o aumento na dispersão de resultados com MQFC não foi devidamente esclarecido e já tinha sido observado na furação de liga de titânio Ti6Al4V.

No rosqueamento, o controle de cavacos desejado não foi obtido com as geometrias Rasant V-40 (geometria 1) e Rasant V-Dry (geometria 2), o que acabou comprometendo a possibilidade de aplicação dessas ferramentas no experimento final. Embora a restrição pudesse ser contornada em ensaios em ambiente de pesquisa laboratorial pela freqüente remoção manual dos cavacos, tal condição é inaceitável para a fabricação seriada de componentes. Nenhuma relação entre o emprego de MQFC e a dificuldade de controle de cavacos mencionada na literatura foi detectada.

Os ensaios preliminares não forneceram indícios de diferença relevante na vida de machos de roscas aplicando jato interno de fluido de corte ou MQFC. Também não se verificou incremento no desempenho pelo emprego do mesmo revestimento nanocomposto testado na furação. O revestimento de multicamada TiCN e TiN prevaleceu como alternativa de menor custo e amplamente difundida em aplicações de rosqueamento na indústria.

A avaliação final da geometria BP70 (geometria 3) empregou MQFC e parâmetros de corte maiores contra o processo anteriormente usado na indústria, que aplicava jato externo de fluido de corte e a geometria 4. A análise de variância comprovou a superioridade de vida média para o novo processo adotado com MQFC, como já previsto. Não há qualquer diferença perceptível de desempenho na comparação de machos para rosca M8x1,25 e M10x1,5 mm. Apenas na geometria 3 se obteve o controle de cavacos desejado.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do desenvolvimento do projeto, algumas oportunidades de aprofundamento do assunto foram identificadas. Segundo a literatura, a redução da força axial pela adoção de geometrias de gume transversal otimizadas, como o topo em “S” (geometria 3) ou “*Split Point*”(geometrias 1 e 2) contribui para o aumento da vida de ferramenta. Uma avaliação comparativa de forças e torque envolvendo essas e outras

geometrias permitiriam verificar se há alguma relação com o desempenho superior da geometria 3 e até mesmo estender a análise para outras concepções de gume transversal de brocas helicoidais.

Havendo uma condição de proteção adequada das quinas, o revestimento de elevada dureza nACo® poderia apresentar um comportamento diferenciado daquele observado nas brocas de geometria RT100U. Sugere-se então verificar se este supernitreto aumentaria a vida das brocas de geometria B256A - HPC, comparando os novos resultados com o que foi verificado neste trabalho para o revestimento PVD com multicamada composta de TiN e TiAlN.

Pode-se alterar as características de proteção de quina da geometria 3, empregando diferentes raios ou tamanhos de *honing*, a fim de identificar a condição mais apropriada para a aplicação. Trabalhos de outros pesquisadores mostram que existe uma região ideal, porém só apresentam resultados para aplicações específicas, o que não permite extrapolações.

A melhor compreensão dos mecanismos de desgaste e avarias envolvidos no processo de furação estudado poderia esclarecer, por exemplo, a razão da maior variabilidade dos resultados na furação com MQFC. Em vista disso, recomenda-se aprofundar a análise destes mecanismos, buscando relacioná-los com os parâmetros de entrada do processo e com as forças e torques de usinagem.

Outras concepções de geradores de *spray* podem impactar positivamente ou não no desempenho das ferramentas testadas. A disponibilidade de um equipamento que permitisse a regulação da vazão de fluido de corte de forma mais precisa, permitiria estudar o comportamento da vida em função dessa variável. Sabe-se também que a concepção de MQFC interno com alimentação da mistura por dentro do eixo-árvore da máquina apresenta o inconveniente da separação de partículas por força centrífuga, especialmente em diâmetros pequenos de ferramentas, onde as rotações são elevadas. Uma concepção com dois tubos separados por dentro do fuso poderia conferir resultados superiores, especialmente em roscas menores, como M5x0,8, que também são usinadas em eixos para motores elétricos.

Outra possibilidade de aprofundamento do trabalho seria a avaliação do comportamento de desgaste em função da velocidade de corte (e do avanço no caso de furação), para as operações de furação e rosqueamento deste trabalho, a fim de gerar curvas de onde se extrai a condição de máxima produtividade e maior economia. Os testes empregariam as melhores geometrias em MQFC.

É recomendável que se faça uma análise comparativa mais ampla de desempenho entre MQFC e jato interno de fluido de corte para o macho M8x1,25 na geometria 3, a fim de estabelecer com maior precisão se as médias são estatisticamente diferentes ou não. Além disso, os ensaios realizados não abrangem a usinagem de todos os eixos especiais para motores elétricos, pois não incluem toda a gama de roscas e nem os eixos de aços inoxidáveis. Sugere-se a realização de testes com MQFC nas concepções especiais de eixos, cujos resultados poderiam eventualmente viabilizar a eliminação completa do jato de fluido de corte na etapa de fabricação estudada.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS

- [1] TEIXEIRA, Cleiton R. **Redução e eliminação de fluidos de corte nos processos de usinagem com ferramentas de corte de geometria definida**. 2001. 157 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [2] DIAS, Alexandre M. de P. **Avaliação ambiental de fluidos de corte utilizados em processos convencionais de usinagem**. 2000. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [3] WEINERT, K. *et alli*. Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. **Annals of the CIRP**, v. 53, n. 2, p. 511-537, 2004.
- [4] ZEILMANN, Rodrigo Panosso. **Furação da liga de titânio Ti6Al4V com Mínimas Quantidades de Fluido de Corte**. 2003. 207 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [5] MOTA, Paulo R. da. **Investigação do comportamento de ferramentas de aço-rápido no processo de rosqueamento interno em alta velocidade de corte**. 2006. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia.
- [6] CAROSELLA, José. **Fundamentos Tecnológicos da Furação Moderna**. Jaraguá do Sul: [S.n.], 2007 (Apostila do Treinamento realizado pela Kennametal do Brasil).
- [7] STOETERAU, Rodrigo Lima. **Aula-03-U-2007-1-cavacos.pdf**. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br>>. Acesso em: 10 fev. 2009.
- [8] MACHADO, Álisson Rocha; DA SILVA, Márcio Bacci. **Usinagem dos metais - HSC**. Uberlândia: [S.n.], 2004 (Apostila do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia).
- [9] STEMMER, Caspar Stemmer. **Ferramentas de Corte I**. 4. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995. 249p.
- [10] MANG, Theo ; DRESEL, Wilfried (Editores). **Lubricants and Lubrication**. Weinheim: Ed. WILEY-VCH, 2001.749p.
- [11] MACHADO, Álisson Rocha; DA SILVA, Márcio Bacci. Fluidos de corte para HSM. In: MARCONDES, Francisco C. *et alli*. **Usinagem em Altíssimas Velocidades**. São Paulo: Ed. Érica, 2003. p. 49-81.
- [12] STOETERAU, Rodrigo Lima. **Aula-06-U-2007-1-fluidos.pdf**. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br>>. Acesso em: 10 fev. 2009.
- [13] HORI, Isao. Como executar o processo em forma de alto desempenho. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 489, p. 28-41, out. 2006.

- [14] KAMMEMEIER, Dirk. **Dry Machining & Minimal Quantity Lubrication**. [S. I.] : Kennametal GmbH & Co., 2004. CD-ROM
- [15] STOETERAU, Rodrigo Lima. **Aula-05-U-2007-1-desgaste.pdf**. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br>>. Acesso em: 10 fev. 2009.
- [16] SCHROETER, Rolf B. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida**. Trabalho não publicado (Apostila do Laboratório de Mecânica de Precisão, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina).
- [17] FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1970. 763p.
- [18] CSELLE, T. Application of Coatings for Tooling - Quo Vadis 2005? **Vakuum in Forschung und Praxis**, v. 17, p. 33-39, abr. 2005. Disponível em: <http://www.platit.com/files/Quo_Vadis_2005.pdf>
- [19] MORSTEIN, M.; CODDET, O.; CSELLE, T. Novas opções para usinagem tradicional e de materiais endurecidos. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 483, p. 318-325, abr. 2006.
- [20] PLATIT. **Guia de revestimentos**. Tabela de propriedades dos revestimentos fornecidos pela empresa. Disponível em: <<http://www.platit.com.br/catalogo/>>. Acesso em: 1 mar. 2009.
- [21] STOETERAU, Rodrigo Lima. **Aula-17-U-2007-1-furacao.pdf**. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br>>. Acesso em: 10 fev. 2009.
- [22] SANTOS, Sandro C. **Furação de ferro fundido cinzento com brocas de metal duro integral**. 1999. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia.
- [23] STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte II**. Florianópolis : Editora da UFSC, 1992. 314p.
- [24] DE ANDRADE, Cássio L. F. **Análise da furação do ferro fundido vermicular com brocas de Metal-duro com canais retos revestidas com TiN e TiAlN**. 2005. 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [25] MIRANDA, G. W. A. **Uma contribuição ao Processo de Furação sem Fluido de Corte com Broca de Metal Duro Revestida com TiAlN**. 2003. 160 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas.
- [26] WILLY VÖGEL AG. **LubriLean MQL Presentation**. Berlin: 2005. CD ROOM
- [27] STOETERAU, Rodrigo Lima. **Aula-14-U-2007-1-roscas.pdf**. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br>>. Acesso em: 07 mar. 2009.
- [28] BRAUCKE, Troy S. Vom. **Establishment of a Database for Tool Life Performance**. 2004. Thesis (Mestrado em Engenharia) – Swinburne University of Technology, Melbourne.

- [29] OSG//TUNGALOY. **Informações ao usuário**. Terminologia de machos de roscar. Disponível em: <<http://www.osg.com.br/v2/paginas/importanteSeguranca.asp?lang=pt>>. Acesso em 07 mar. 2009.
- [30] OSG. **Ferramentas de precisão – Informações de produtos**. [S. I.: s. n.], [198?]. 287 p.
- [31] REIS, A.M. *et alli*. Study of Wear on Tapping Tools When Machining Grey Cast Iron at Low Cutting Speeds. **CIRP Journal of Manufacturing Systems**, v. 36, p. 7-12, 2007.
- [32] RUNGE, Peter R.F., DUARTE, Gilson N. **Lubrificantes nas Indústrias**. São Paulo: Ed. TriboConcept, 1989. 313 p.
- [33] QUEIROZ, Jorge L. L. **Desenvolvimento de um protótipo de software para controle da variável ambiental na utilização do fluido de corte**. 2001. 188 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [34] CAPELLETTI, Raquel V. **Avaliação da atividade de biocidas em Biofilmes formados a partir de fluido de Corte utilizado na usinagem de metais**. 2006. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas.
- [35] WEINGAERTNER, W. L. & PINTO, Fábio Wagner. **The evolution of the MMKS systems: automation brings growth to the system's efficiency through the use of lubrication's strategies**. Florianópolis: 2002. Trabalho não publicado (Seminário do Laboratório de Mecânica de Precisão, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina).
- [36] ISCAR DO BRASIL. **Linhas de produto - furação**. Disponível em: <<http://www.iscar.com.br/ProductLines/ProductLineDetail.asp/CountryID/4/ProductLineDetailID/406>>. Acesso em 07 mar. 2009.
- [37] LUGSCHEIDER, E. *et alli*. Investigations on hard coated reamers in different lubricant free cutting operations. **Surface and Coatings Technology**, v. 90 p. 172-177, mar. 1997. Disponível em : < http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=879527464&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=cba4bcb7a625ebc7860aa767b865d022>
- [38] DUDZINSKI, D. *et alli*. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 44, p. 439–456, mar. 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=879528870&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=95ac302ac68a227f7bb36136a56a06dc>
- [39] VALLE, Pablo D. **Avaliação da influência da minimização e eliminação do fluido de corte no processo de fresamento de topo reto**. 2001. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [40] MARKUS, Walmir. **Aspectos tecnológicos da minimização e eliminação do fluido de corte no processo de torneamento com insertos de metal-duro revestidos com TiN**. 2001.

111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

[41] DINIZ, Anselmo E. ; DE OLIVEIRA, Adilson J. Optimizing the use of dry cutting in rough turning steel operations. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 44, p. 1061–1067, ago. 2004. Disponível em : <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=879531488&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=c7d49178e7b296e2e42c35973350fa76>

[42] SHEFELBINE, Wendy; DORNFELD, David A. **The Effect of Dry Machining on Burr Size**. Disponível em: <<http://repositories.cdlib.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1020&context=лма>>. Acesso em 07 mar. 2009.

[43] GERMAN FEDERATION OF INSTITUTIONS FOR ACCIDENT INSURANCE AND PREVENTION – HVBG. **BGI 718: Minimum quantity lubrication in machining production**. Dresden: 2006. 62 p.

[44] KARDEKAR, Abhijit Dilip. **Modeling and optimization of machining performance measures in face milling of automotive aluminum alloy A380 under different lubrication/cooling conditions for sustainable manufacturing**. 2005. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). University of Kentucky.

[45] PINTO, Fábio W. **Desenvolvimento de um sistema de mínimas quantidades de fluido de corte integrado ao controle de uma fresadora CNC**. 2002. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

[46] MAPAL DR. KRESS AG. **Tecnologia Mapal para MQL.ppt**. Aalen, [maio de 2005]. 1 arquivo (7,2 Mbytes) Criado em 04/05/2006. Powerpoint for windows.

[47] LI, Kuan-Ming. **Predictive modeling of near dry machining: mechanical performance and environmental impact**. 2006. 187 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Georgia Institute of Technology.

[48] SUTHERLAND, John W. **Issues Associated with the Use of Cutting Fluids in Machining Operations**. Disponível em: <http://www.me.mtu.edu/~jwsuther/erdm/lect33_a.pdf>. Acesso em 07 mar. 2009.

[49] WEINERT, K. **Trockenbearbeitung und Minimalmengen Kühlschmierung – Einsatz in der spanenden Fertigungstechnik**. Berlin-Heidelberg: Ed. Springer Verlag, 1999. 230 p.

[50] OBIKAWA, Toshiyuki *et alli*. High-speed grooving with applying MQL. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46, pp. 1854–1861, nov. 2006. Disponível em : <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=879534027&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=3129849f98e11b369efa2e024cdd4369>

[51] KLOCKE, F. ; EISENBLATTER G. Machinability investigation of the drilling process using minimal cooling lubrication techniques. **Annals of the CIRP**, v. 46, t. 1, p. 19–24, 1997.

[52] HEINEMAN, R. *et alli*. Effect of MQL on the tool life of small twist drills in deep-hole drilling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46, p.1–6, jan. 2006. Disponível em : <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=879538840&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=48bc54e8bdd3fa609a54150dc17d0edd>

[53] RAHMAN, M.; KUMAR, A. Senthil & SALAM, M.U. Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 42, p. 539–547, abr. 2002. Disponível em : <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=879539118&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=528ab907353f014ca6ef23335c9a2591>

[54] KISHAWY, H.A. *et alli*. Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 45, p. 219–227, fev. 2005. Disponível em : <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=879538449&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=770b98fa990a9f253fb73fcd98aabd56>

[55] YOSHIMURA, H. Contribuições da manufatura para adaptação às leis ambientais. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 483, p. 88-109, abr. 2006.

[56] TOOLING & PRODUCTION. **Near dry machining is automotive cost cutter**. Disponível em: <http://findarticles.com/p/articles/mi_qa5347/is_200409/ai_n21355859>. Acesso em 07 mar. 2009.

[57] PANNONI, Fábio D. **Aços estruturais**. Disponível em: <http://www.gerdau.com.br/gerdauacominas/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnicapf/artigostecnicos/A%C3%A7os_estruturais.pdf>. Acesso em 07 mar. 2009.

[58] FIOD NETO, Miguel. **Planejamento de experimentos e métodos de Taguchi**. Trabalho não publicado (Apostila do Curso de Especialização em Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina).

[59] PLATIT. **Tipos de Revestimentos - AlboNiT**. Disponível em: <<http://www.platit.com.br/index.php?Secao=albonit>>. Acesso em 05 mai. 2009.

[60] GEY, Christoph. Novos revestimentos dão origem a ferramentas mais eficientes. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 485, p. 52-67, jun. 2006.

[61] OERLIKON BALZERS. **Coating guide**. Disponível em: <http://coating-guide.balzers.com/DAssets/EN_AL.pdf>. Acesso em 05 mai. 2009.

[62] KRAUSS, George. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. Ohio: Ed. ASM International, 2005. 613p.

[63] WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R. B., TEIXEIRA, C. R., CASTRO, P. R. Brocas Helicoidais de Aço Rápido na Furação com MQL e a Seco. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 438, p. 128-141, jul. 2002.

[64] HANN, D. M. *et alli*. An experimental study of cutting fluid effects in drilling. **Journal of Material Processing Technology**, v. 71, n. 2, p. 305-313, nov. 1997. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=892148993&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=275379e234bccbe7b4261b5320c3af75>.

[65] MIN, S. *et alli*. A Study on Tribology in Minimal Quantity Lubrication Cutting. **CIRP Annals**, v. 54, n. 1, p. 105-108, 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=892151386&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=c545d11b6bfb90f637db8d425f156fca>.

[66] WAKABAYASHI *et alli*. Tribological Characteristics and Cutting Performance of Lubricant Esters for Semi-dry Machining. **CIRP Annals**, v. 52, n. 1, p. 61-64, 2003. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=892154392&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=083c9334b024e9b860e2184e75d9bca2>.

[67] MACAGNANI, Guilherme R. **Estudo e Desenvolvimento de Sistema de Refrigeração MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante)**. Artigo online. Disponível em: <<http://www.unimep.br/phpg/mostraacademica/anais/4mostra/pdfs/574.pdf>>.

ANEXOS

1. CÁLCULO DE VAZÃO DO JATO EXTERNO EM CENTRO DE USINAGEM

Foi utilizada uma balança URANO, modelo UR10000. A massa do recipiente de medição vazio é 0,755 +/-0,002 kg. Após 20 segundos de abertura da válvula de alimentação de fluido de corte, a massa total foi medida. O procedimento de enchimento em 20 segundos foi repetido gerando um segundo valor de massa. Determinou-se o valor médio das duas medições para o cálculo de vazão conforme segue:

Primeira medição: 7,640 kg +/- 0,005 kg

Segunda medição: 7,425 kg +/- 0,005 kg

Média: 7,532 kg +/- 0,005 kg

Massa de fluido de corte: $7,532 - 0,755 = 6,775 \text{ +/- } 0,007 \text{ kg}$

Densidade do fluido de corte (não emulsionado): 0,978 kg/l

Densidade do fluido de corte (emulsionado a 20,5% de concentração):
 $0,978 * 0,20 + 1 * 0,8 = 0,9955 \text{ kg/l}$

Vazão = $6,775 * (60/20) / 0,9955 = 20,417 \text{ l/min +/- } 0,007 \text{ l/min} \approx \mathbf{20,4 \text{ l/min}}$

2. CÁLCULO DOS COEFICIENTES USADOS PARA ANOVA E TESTES DE TUKEY

Análise de variância com múltiplos tratamentos e dois ensaios por tratamento do processo de furação:

	Condição 1	Condição 4	Condição 5	Condição 6	Condição 7*	Condição 8	Condição 9
Repetição 1	23,0	80,7	19,8	27,4	16,8	140,6	21,1
Repetição 2	23,2	15,1	20,2	6,6	37,5	160,2	26,0
Média	23,1	47,9	20,0	17,0	27,2	150,4	23,6

Correção (C) = $(\sum \text{valores individuais})^2 / (\text{N}^\circ \text{ tratamentos} * \text{N}^\circ \text{ de repetições})$

$$C = (23,0+80,7+19,8+27,4+16,8+140,6+21,1+23,2+15,1+20,2+6,6+37,5+160,2+26,0)^2 / (7*2) = 27.295,56$$

Soma dos Quadrados dos Tratamentos (SQTr) = $(\sum \text{Tratamentos})^2 / \text{N}^\circ \text{ de repetições} - C$

$$\text{SQTr} = ((23,0+23,2)^2 + (80,7+15,1)^2 + (19,8+20,2)^2 + (27,4+6,6)^2 + (16,8+37,5)^2 + (140,6+160,2)^2 + (21,1+26,0)^2) / 2 - 27.295,56 = 27.549,41$$

Soma dos Quadrados Total (SQT) = $\sum (\text{valores individuais})^2 - C$

$$\text{SQT} = 23,0^2 + 80,7^2 + 19,8^2 + 27,4^2 + 16,8^2 + 140,6^2 + 21,1^2 + 23,2^2 + 15,1^2 + 20,2^2 + 6,6^2 + 37,5^2 + 160,2^2 + 26,0^2 - 27.295,56 = 30.331,39$$

Soma dos Quadrados do Resíduo (SQR) = $\text{SQT} - \text{SQTr} = 30.331,39 - 27.549,41 = 2.781,98$

Quadrado Médio dos Tratamentos (QMTr) = $\text{SQTr} / (\text{N}^\circ \text{ de tratamentos} - 1) = 4.591,57$

Quadrado Médio do Resíduo (QMR) = $\text{SQR} / (\text{N}^\circ \text{ de ensaios} - \text{N}^\circ \text{ de tratamentos}) = 397,43$

Função F de Snedecor calculada (Fcalc.) = $\text{QMTr} / \text{QMR} = 11,55$

O valor crítico da função é tabelado e depende do n° de graus de liberdade do denominador (resíduo) e do numerador (tratamentos) na relação calculada:

N° de graus do resíduo = $(\text{N}^\circ \text{ de ensaios} - \text{N}^\circ \text{ de tratamentos}) = 7$

N° de graus dos tratamentos = $(\text{N}^\circ \text{ de tratamentos} - 1) = 6$

Análise de variância para experimento fatorial completo com duas variáveis em dois níveis empregando duas repetições de ensaios no processo de rosqueamento:

Ensaio nº	Processo	Rosca	Interação	♦ Vida (min)	Repetição 1	Repetição 2
1	Nível 1	Nível 1	Nível 1	29,6	9,6	20,0
2	Nível 1	Nível 2	Nível 2	33,3	16,5	16,8
3	Nível 2	Nível 1	Nível 2	95,3	48,6	46,7
4	Nível 2	Nível 2	Nível 1	99,7	46,5	53,2

Primeira coluna: Fator A = Processo

Segunda coluna: Fator B = Rosca

Terceira coluna: Interação (AxB)

Soma dos Quadrados do Fator A (SQA) = $(\sum \text{Nível 1 na coluna 1} - \sum \text{Nível 2 na coluna 1})^2 /$
Nº ensaios da coluna 1

$$SQA = ((29,6+33,3) - (95,3+99,7))^2/8 = 2.184,407$$

Soma dos Quadrados do Fator B (SQB) = $(\sum \text{Nível 1 na coluna 2} - \sum \text{Nível 2 na coluna 2})^2 /$
Nº ensaios da coluna 2

$$SQB = ((29,6+95,3) - (33,3+99,7))^2/8 = 8,173$$

Soma dos Quadrados da Interação AxB (SQAxB) = $(\sum \text{Nível 1 na coluna 3} - \sum \text{Nível 2 na}$
coluna 3)² / Nº ensaios da coluna 3

$$SQAxB = ((29,6+99,7) - (33,3+95,3))^2/8 = 0,064$$

O quadrado médio de cada tratamento é igual a soma dos quadrados, pois cada tratamento tem grau de liberdade 1. O quadrado médio total e do resíduo é calculado da mesma forma que na construção experimental da furação. Assim:

$$F_{\text{calculado A}} = QMA/QMR = 2.184,407/19,69 = 110,96$$

$$F_{\text{calculado B}} = QMB/QMR = 8,17/19,69 = 0,42$$

$$F_{\text{calculado AxB}} = QMAxB/QMR = 0,064/19,69 = 0,00$$

Os valores tabelados de F levam em conta 1 grau de liberdade no numerador (tratamento) e 4 graus de liberdade no resíduo.

Testes de Tukey:

Os testes de Tukey utilizam-se do quadrado médio do resíduo calculado na ANOVA para estabelecer a chamada “diferença mínima significativa (d.m.s.)” entre duas médias, ou seja, o valor crítico acima do qual pode-se afirmar que as médias são diferentes no nível de significância estatística escolhido. A d.m.s. é da por:

$$\text{d.m.s.} = q \cdot (\text{QMR} / \text{N}^\circ \text{ de repetições})^{0,5}$$

Onde “q” é um coeficiente tabelado que varia em função do nível de significância escolhido, do número de graus de liberdade do resíduo e do número de tratamentos. Para a furação temos: $q(5\%) = 5,61$ para 7 graus de liberdade no resíduo e 7 tratamentos. Então:

$$\text{d.m.s.} = 5,61 \cdot (397,43/2)^{0,5} = 79,1$$