

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

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS MEIOS LUBRI-REFRIGERANTES NA FURAÇÃO DO
FERRO FUNDIDO VERMICULAR COM BROCAS HELICOIDAIS DE METAL-DURO
REVESTIDAS COM TiAIN**

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

JÚLIO CELSO DOS SANTOS BOSSARDI

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 2008.

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

***ANÁLISE COMPARATIVA DOS MEIOS LUBRI-REFRIGERANTES NA FURAÇÃO DO
FERRO FUNDIDO VERMICULAR COM BROCAS HELICOIDAIS DE METAL DURO
REVESTIDAS COM TiAIN***

JÚLIO CELSO DOS SANTOS BOSSARDI

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

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

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Salete Martins Alves, Dr. Eng.
Co-orientadora

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D. Sc.
Coordenador da Pós-Graduação

BANCA EXAMINADORA:

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.
Presidente

Prof. Rodrigo Lima Stoeterau, Dr. Eng.

Prof. Alexandre Magno de Paulo Dias, Dr. -Ing.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA	15
RESUMO	18
ABSTRACT	19
1 INTRODUÇÃO	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Ferro fundido vermicular (CGI)	22
2.1.1 Considerações microestruturais.....	22
2.1.2 Propriedades do ferro fundido vermicular.	23
2.1.3 Argumentos ecológicos para utilização do ferro fundido vermicular	24
2.2 Processo de furação	25
2.2.1 Brocas helicoidais	26
2.2.2 Parâmetros de corte no processo de furação	27
2.2.3 Forças de corte em furação.....	29
2.3 Formação dos cavacos	30
2.3.1 Tipos dos cavacos	30
2.3.2 Formas dos cavacos.....	31
2.4 Desgastes das ferramentas	32
2.4.1 Tipos de desgastes em brocas e critério de fim de vida	32
2.4.2 Mecanismos de desgaste	35
2.5 Revestimentos para ferramentas de usinagem.....	36
2.6 Qualidade no processo de furação	38
2.6.1 Erros comuns na geometria do furo	39
2.6.2 Qualidade da superfície na furação.....	40
2.7 Usinabilidade	42

2.7.1	Características de usinabilidade de ferros fundidos	42
2.7.2	Usinabilidade de ferro fundido vermicular	43
2.7.3	Influência da forma da grafita do ferro fundido vermicular	44
2.8	Meios lubri-refrigerantes ou fluidos de corte	45
2.8.1	Funções dos meios lubri-refrigerantes	46
2.8.2	As principais funções dos meios lubri-refrigerantes	47
2.8.3	Classificação dos meios lubri-refrigerantes e suas vantagens e desvantagens	51
2.8.4	Função de um meio lubri-refrigerante no processo de furação	55
2.8.5	Aditivos anti-desgaste ou EP em meios lubri-refrigerantes	55
2.8.6	Seleção do meio lubri-refrigerante	55
2.8.7	Manutenção e monitoramento dos meios lubri-refrigerantes	56
2.8.8	Reciclagem e descarte dos meios lubri-refrigerantes	59
2.8.9	Sustentabilidade do uso dos produtos químicos	60
2.8.10	Política ambiental para meios lubri-refrigerantes	62
2.8.11	Atuais tendências para utilização dos meios lubri-refrigerantes	62
3	MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1	Corpos-de-prova	66
3.1.1	Análises mecânicas e composição química	67
3.1.2	Análise microestrutural.....	68
3.1.3	Determinação da dureza.....	71
3.1.4	Determinação das propriedades mecânicas.....	72
3.2	Máquina-ferramenta Utilizada	73
3.3	Identificação e caracterização das brocas.....	73
3.3.1	Critérios de fim-de-vida das brocas.....	74
3.4	Parâmetros de corte	75
4	PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO EXPERIMENTAL	76
4.1	Pré-ensaios de furação	76
4.2	Ensaios de furação	76
4.3	Fixações da peça e da ferramenta	77
4.3.1	Fixação da ferramenta.....	77
4.3.2	Fixação da peça	78
4.4	Medição do desgaste das ferramentas	79
4.5	Avaliação da qualidade dos furos	80

4.6	Avaliação por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e micro-sonda (EDS) .	81
4.7	Avaliação dos meios Lubri-refrigerantes	83
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	85
5.1	Introdução	85
5.2	Ensaio de vida	85
5.3	Diâmetro	88
5.4	Circularidade	89
5.5	Retitude.....	92
5.6	Cilindricidade	93
5.7	Rugosidade.....	95
5.8	Análise do desempenho dos meios lubri-refrigerantes através da análise do revestimento das brocas	99
5.8.1	Resultados das análises por microscopia eletrônica de varredura e por micro-sonda	100
5.8.2	Análise microestrutural da parede do furo após usinagem	105
6	CONCLUSÕES	108
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
8	REFERÊNCIAS	112
9	ANEXOS.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Componentes fabricados na indústria automotiva de ferro fundido cinzento.....	20
Figura 2.1 - Variantes do processo de furação (segundo DIN 8589) (König 1997).....	26
Figura 2.2 - Partes de uma broca helicoidal (Diniz, 2003; Stemmer,1992).....	27
Figura 2.3 - Grandezas de corte no processo de furação (Schroeter e Weingaertner, 2002)...	29
Figura 2.4 - Forças na broca helicoidal (Schroeter e Weingaertner, 2002).....	29
Figura 2.5 - Formas de cavacos e sua classificação (CIMM, 2007).....	32
Figura 2.6 - Medição de desgastes de flanco (Bork, 1995).....	33
Figura 2.7 - Posição para medição do desgaste em guias (Bork, 1995).....	33
Figura 2.8 - Desgaste de cratera em brocas (Bork, 1995).....	34
Figura 2.9 - Lascamentos no gume principal da broca (Bork, 1995).....	34
Figura 2.10 - Causas de desgaste na usinagem (König, 1997).....	35
Figura 2.11 - Falhas em ferramentas de corte (Bunshah, 2001).....	36
Figura 2.12 - Erros comuns no processo de furação (König, 1997; Wick, 1988).....	39
Figura 2.13 - Conceitos básicos na avaliação de superfícies (König, 1997).....	41
Figura 2.14 - Presença de MnS_2 como camada protetora ao gume da ferramenta de PCBN na usinagem do ferro fundido cinzento (a); Ausência da camada de MnS_2 no gume durante a usinagem do ferro fundido vermicular (b) (Dawson et al, 2001; Georgiou, 2002). (a)(b).....	44
Figura 2.15 - Propagação de trincas na grafita lamelar do ferro cinzento, à frente da ferramenta de corte (a); Dificuldade da propagação de trincas nas grafitas vermiculares devido à sua forma, além do seu entrelaçamento com outras grafitas e com a matriz metálica	

(b) (Andrade, 2005).....	45
Figura 2.16 - Distribuição das temperaturas numa ferramenta (Yushiro, 2007).....	47
Figura 2.17 - Distribuição do calor entre peça, ferramenta e cavaco (Teixeira, 2001).....	48
Figura 2.18 - Curvas de perda de dureza em função da temperatura para diferentes materiais de ferramentas (Runge e Duarte, 1989).....	49
Figura 2.19 - Seção transversal da interface cavaco e ferramenta (Yushiro, 2007).....	49
Figura 2.20 - Classificação dos Fluidos de Corte (Gomes, 2005).....	51
Figura 2.21 - Formação adequada de uma solução do meio lubri-refrigerante (IOWA, 1990).....	52
Figura 2.22 - Refratômetro utilizado para manutenção da concentração do fluido (Gomes, 2005).....	58
Figura 2.23 - A influência do pH sobre a seleção adequada de fluidos de corte solúveis (Runge e Duarte, 1989; Yushiro, 2007).....	59
Figura 2.24 - Disposição de fluidos de corte para reciclagem (Catai e Bianchi, 2007).....	60
Figura 2.25 - Ciclo de vida dos produtos químicos baseados em fonte renováveis (Alves, 2005).....	61
Figura 2.26 - Fatores influentes na usinagem a seco (Schroeter e Weingaertner, 2002).....	63
Figura 3.1 - Corpo de prova de ferro fundido vermicular utilizado no experimento.....	67
Figura 3.2 - Microscópio utilizado para avaliação dos corpos de prova.....	69
Figura 3.3 - Micrografias representativas de uma região do núcleo das amostras 1, 2 e 3 dos corpos de prova (sem ataque, aumento 100x) utilizados na pesquisa, onde se observam as grafitas de vermicular e nodular e a matriz metálica.....	70
Figura 3.4 - Micrografias representativas de uma região do núcleo das amostras 1, 2 e 3 dos corpos de prova (com ataque nital 3%, aumento 100x) utilizados na pesquisa, onde se	

observam as grafitas de vermicular e nodular e a matriz perlítica com pouca ferrita.....	70
Figura 3.5 - Amostras de ferro fundido vermicular utilizadas para análise metalográfica e medição de dureza.....	71
Figura 3.6 - Corpo de prova de ferro fundido vermicular utilizado para o ensaio de tração...	72
Figura 3.7 - Centro de usinagem Feeler utilizado no experimento.....	73
Figura 3.8 - Broca helicoidal usada no experimento.....	73
Figura 3.9 - Ilustração dos desgastes VB e VB _{max} de uma broca (Schroeter, 1999).....	74
Figura 4.1 - Fixação da ferramenta no cone.....	78
Figura 4.2 - Fixação do corpo de prova na máquina.....	78
Figura 4.3 – Microscópio utilizado para avaliação do desgaste das brocas.....	79
Figura 4.4 - Medição do desgaste da broca durante os ensaios.....	79
Figura 4.5 - Micrômetro Mitutoyo interno de três pontos.....	80
Figura 4.6 - Tridimensional Zeiss Prismo Navigator.....	81
Figura 4.7 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	82
Figura 4.8 - Fixação das ferramentas para avaliação MEV e EDS. (a) Análise do ângulo de folga da ferramenta, (b) Análise do ângulo de saída do cavaco.....	83
Figura 5.1 - Curvas de desgastes obtidas para condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e Seco.....	86
Figura 5.2 - Caracterização dos desgastes das brocas para as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e Seco. Velocidade de Corte = 110 m/min. Aumento da imagem igual a 500 x.....	87
Figura 5.3 - Diâmetro médio no início e fim de vida das condições utilizadas no experimento sob velocidade de corte de 110 m/min.....	88
Figura 5.4 - Gráfico Boxplot de Diâmetro entre as condições utilizadas para o experimento:	

meios lubri-refrigerantes, A, B, C e Seco. Velocidade de Corte = 110 m/min.....	89
Figura 5.5 - Circularidade média obtida no início de vida das condições utilizadas no experimento. Velocidade de corte = 110 m/min.....	90
Figura 5.6 - Circularidade média obtida no fim de vida das condições utilizadas no experimento. Velocidade de corte = 110 m/min.....	90
Figura 5.7 - Gráfico Boxplot de Circularidade obtido no fim de vida entre as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e Seco. Velocidade de Corte = 110 m/min.....	91
Figura 5.8 - Gráfico Boxplot de retitude entre as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e Seco. Velocidade de Corte = 110 m/min.....	92
Figura 5.9 - Gráfico Boxplot de Cilindricidade entre as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e Seco. Velocidade de Corte = 110/min.....	94
Figura 5.10 - Gráfico Boxplot de Rugosidade R_a entre as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e Seco. Velocidade de Corte de 110 m/min.....	96
Figura 5.11 - Gráfico Boxplot de Rugosidade R_z entre as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e Seco. Velocidade de Corte de 110 m/min.....	97
Figura 5.12 - Rugosidade R_a média das condições utilizadas no experimento. Velocidade de corte = 110 m/min.....	98
Figura 5.13 - Rugosidade R_z média das condições utilizadas no experimento. Velocidade de corte = 110 m/min.....	98
Figura 5.14 - Região da ferramenta utilizada para as análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por micro-sonda (EDS).....	99
Figura 5.15 - Exemplos do resultado do espectro das análises da superfície da ferramenta após fim-de-vida na condição a seco, sob $v_c= 110$ m/min.....	101

Figura 5.16 - Exemplos do resultado do espectro das análises da superfície da ferramenta após fim-de-vida para o meio lubri-refrigerante C, sob $v_c= 110$ m/min.....	102
Figura 5.17 - Exemplos do resultado do espectro das análises da superfície da ferramenta após fim-de-vida para o meio lubri-refrigerante A, sob $v_c= 110$ m/min.....	103
Figura 5.18 - Exemplos do resultado do espectro das análises da superfície da ferramenta após fim-de-vida para o meio lubri-refrigerante B, sob $v_c= 110$ m/min.....	104
Figura 5.19 - Esquema que caracteriza a formação da camada protetora entre a ferramenta de corte e peça.....	106
Figura 5.20 - Encruamento da parede do furo após usinagem à $v_c=110$ m/min: (a) parede do primeiro furo usinado; (b) parede do último furo usinado. Aumento de 1000x.....	106

1. LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades da Grafita: Ferro Fundido Cinzento; Ferro Fundido Vermicular; Ferro Fundido Nodular (David, 2001; Queiroz, Boehs e Sant'anna, 1999; Sahn, Abele e Schulz, 1994).....	23
Tabela 2.2 - Características dos meios lubri-refrigerantes (Yushiro, 2007; Webster,1995).....	56
Tabela 3.1 - Dimensões do corpo de prova utilizado no experimento.....	70
Tabela 3.2 - Composição química das placas de ferro fundido vermicular utilizadas na pesquisa.....	72
Tabela 3.3 - Composição química das placas de ferro fundido vermicular utilizadas na pesquisa.....	72
Tabela 3.4 - Porcentagem de perlita, forma da grafita e nodularização na estrutura das placas utilizadas nos ensaios.....	73
Tabela 3.5 - Dureza Brinell média e o desvio padrão dos corpos de prova de ferro fundido vermicular.....	76
Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas do material utilizado no experimento.....	77
Tabela 3.7 - Especificações da broca helicoidal.....	79
Tabela 3.8 - Parâmetros de corte utilizado no experimento.....	80
Tabela 4.1 - Descrição dos fluidos utilizados na furação do ferro fundido vermicular.....	90
Tabela 5.1 - Percentual médio de peso de elementos encontrados na face das brocas revestidas no final de vida da broca, em regiões próximas ao gume de corte.....	107
Tabela 5.2 – Análise dimensional e visual das regiões encruadas dos furos, $v_c = 110$ m/min.....	114

SIMBOLOGIA

a_e	[mm]	Profundidade de Corte Radial
a_p	[mm]	Profundidade de Corte Axial
b	[mm]	Comprimento ativo de Corte do Gume
D	[mm]	Diâmetro
d_1	[mm]	Diâmetro no Ponto 1
d_2	[mm]	Diâmetro no Ponto 2
F_c	[N]	Força de Corte
F_f	[N]	Força de Avanço
FR	[N]	Força Resultante
F_x	[N]	Força na Direção X
F_y	[N]	Força na Direção Y
F_{xy}	[N]	Força Resultante no Plano XY
F_t	[N]	Força Tangencial de Corte
f	[mm]	Avanço
f_z	[mm]	Avanço por Gume
F_z	[N]	Força na Direção Z
h	[mm]	Espessura do Cavaco
KB	[mm]	Marca de Desgaste na Face da Ferramenta de Corte
KM	[mm]	Afastamento Médio da Cratera
KT	[mm]	Profundidade de Cratera
l_1	[mm]	Comprimento Total
l_c	[mm]	Comprimento de Corte
l_f	[mm]	Comprimento de Avanço
l_t	[mm]	Comprimento Total dos Gumes em Ação
n	[rpm]	Rotação da Árvore da Máquina-Ferramenta
Q	[mm ³ /min]	Taxa de Usinagem
Q_{ges}	[kJ]	Quantidade de Calor Total da Remoção
Q_{sp}	[kJ]	Quantidade de Calor Transferido ao Cavaco
Q_{kss}	[kJ]	Quantidade de Calor Transferido ao Fluido de Corte
Q_{we}	[kJ]	Quantidade de Calor Transferido à Peça
Q_{ws}	[kJ]	Quantidade de Calor Transferido à Ferramenta
R	[mm]	Raio
R_a	[μ m]	Rugosidade Média Aritmética

t	[s]	Tempo
T_f	[min]	Vida da Ferramenta em Função do Avanço
VB	[mm]	Desgaste no Flanco da Ferramenta de Corte
VB_{max}	[mm]	Desgaste de flanco máximo
$VB_{méd}$	[mm]	Desgaste de flanco médio
v_c	[m/min]	Velocidade de Corte
z	_____	Número de Gumes de Corte
α	[°]	Ângulo de Folga (Incidência) da Ferramenta de Corte
β	[°]	Ângulo da Cunha de Corte da Ferramenta
κ	[°]	Âng. de Incidência do Gume Principal
λ	[°]	Ângulo de Hélice do Gume Principal
γ	[°]	Ângulo de Saída da Ferramenta de Corte
γ'_p	[°]	Ângulo de Saída Passivo do Gume Secundário
φ_c	[°]	Ângulo de Engajamento
$1-m_c$	_____	Expoente de Kienzle

ABREVIATURA

AR	_____	Aço-Rápido
C	_____	Carbono
CBN	_____	Nitreto de Boro Cúbico
CGI	_____	Compacted Graphite Iron
Co	_____	Cobalto
CVD	_____	Chemical Vapour Deposition
DIN	_____	Deutsche Industrie-Normen
EDS	_____	Energy Dispersive Spectrometer
ELA	_____	Environmental Investigation Agency
EPA	_____	Environmental Protection Agency – US
Fe	_____	Ferro
HSC	_____	High Speed Cutting
HSM	_____	High Speed Machining
HSP	_____	High Speed Performance
HSS	_____	High Speed Steel
IMAC	_____	Meios Auxiliares de Corte
MD	_____	Metal-Duro
MQFC	_____	Mínima Quantidade de Fluido de Corte
N	_____	Nitrogênio
O	_____	Oxigênio
QMFC	_____	Quantidade Mínima de Fluido de Corte
QRFC	_____	Quantidade Reduzida de Fluido de Corte
SAE	_____	Society of Automotive Engineers
TiAlN	_____	Titânio-Alumínio-Nitreto
TiCN	_____	Carbonitreto de Titânio
TiN	_____	Nitreto de Titânio
UDESC	_____	Universidade do Estado de Santa Catarina
UFSC	_____	Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

O aumento da eficiência térmica, aliado à redução do peso do motor, caracteriza o bloco de motor a diesel, em cuja fabricação é cada vez mais utilizado o ferro fundido vermicular (CGI). O emprego desse material viabiliza a construção de veículos com motores mais eficientes, no sentido de diminuir tanto o consumo de combustível quanto a emissão de poluentes, como monóxido de carbono e hidrocarbonetos, se comparado ao ferro fundido cinzento. Porém, apesar de extremamente vantajoso no que tange à funcionalidade do produto final, o ferro fundido vermicular se apresenta um dos piores materiais para blocos se analisado em termos de usinabilidade. Sendo a furação um dos processos mais utilizados em operação de usinagem, inclusive em usinagem de CGI, neste trabalho é analisado o comportamento de brocas helicoidais mediante emprego de diferentes fluidos de corte. O presente estudo focou o comportamento das brocas helicoidais para três diferentes meios lubri-refrigerantes, com velocidade de corte de 110 m/min sob avanço único. Avaliou-se o desgaste, variações de diâmetro, rugosidades produzidas e erros de forma dos furos obtidos. Também foram realizadas análises por EDS de elementos químicos presentes em regiões distintas da ferramenta, com o intuito de melhor compreender quais os mecanismos de desgaste presentes em cada uma delas. De modo geral, o trabalho visa determinar o fluido de corte mais adequado à usinagem do ferro fundido vermicular com broca helicoidal, observando a relação custo-benefício que resulte de tal procedimento. É possível assim, um aumento na competitividade da indústria na área de fabricação de blocos de motor em ferro fundido vermicular.

Palavras-chave: Ferro fundido vermicular, broca helicoidal, fluido de corte.

ABSTRACT

The thermal efficiency increase associated to the reduction of the engine weight, characterizes the engine block diesel, in whose manufacture the usage of Compacted Graphite Iron is increasing. The CGI utilization makes possible the construction of vehicles with more efficient engines, in terms of decreasing both fuel consumption and pollutants emission, as carbon monoxide and hydro-carbons, once compared with Gray Cast Iron. However, despite of being extremely advantageous regarding the functionality of its final product, CGI is a difficult material by means of machining to be used in blocks. Considering that drilling is one of the most used machining processes, including CGI machining, helical drills behavior with different cutting fluid utilization will be observed in this study, beholding the fluid influence over the tool wear. This research focused on the behavior of helical drills for three different cutting fluid managed, in what was used the cutting speed of 110 m/min under one feed rate. It was evaluated wear, diameter, roughness and holes form errors for the holes obtained. EDS analysis of chemical elements present on drills different areas were also realized, in order to understand the wearing mechanisms for each tool. The aim of this study in general is determine the most suitable cutting fluid on the Compacted Graphite Iron machining with helical drill, longing also for the cost-benefit relation that such procedure comes to offer to Tupy S.A. It is still intended to continue the studies that Engineers Mocellin (2002) and Andrade (2005) had developed. Their essays are respectively about Condition of the CGI in terms of machining and Behavior of some coats in the income of drills in the machining of that material. Thus, it is possible to increase the industry competitiveness in the area of engine blocks manufacturing with compacted graphite iron.

Keywords: Compacted Graphite Iron, helical drill, cutting fluid.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente os materiais mais comuns para fabricação de blocos de motores são o ferro fundido cinzento, ferro fundido vermicular (CGI) e ligas de alumínio (Marquard, Helfried e McDonald, 1998). O ferro fundido vermicular oferece uma combinação intermediária de propriedades não encontradas no ferro fundido cinzento em termos de ductilidade e maleabilidade. Embora a demanda pelo CGI ainda seja relativamente baixa em comparação aos outros ferros fundidos, o crescimento potencial da utilização desse material é considerado alto. Para a primeira década do século XXI a previsão é que haja um aumento de cinquenta por cento da demanda de ferro fundido vermicular (Powell e Levering, 2002).

Segundo Guessser e Guedes (1997) o grande indicador desta tendência é a própria indústria automotiva, que demonstra grande aceitação por este material nos mais diversos componentes. Dentre esses componentes, pode-se citar coletores de escapamento, discos de freio, cabeçotes de motor e principalmente blocos de motor a óleo diesel, normalmente fabricados em ferro fundido cinzento conforme ilustrado na Figura 1.1.

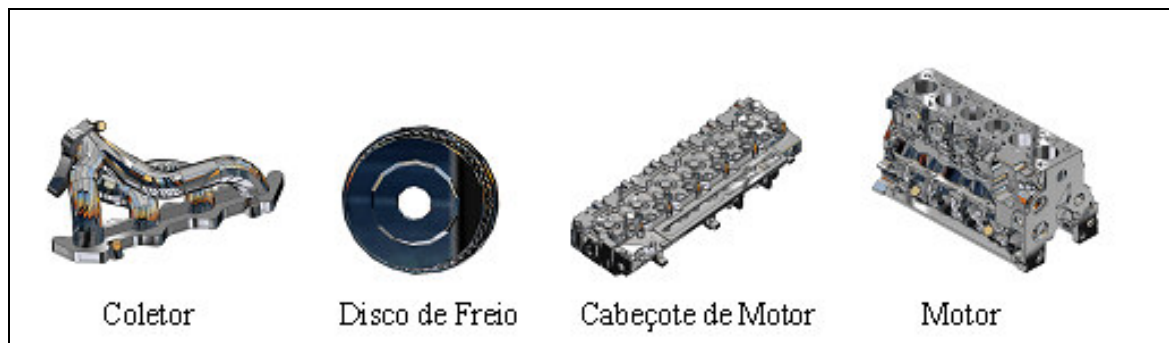


Figura 1.1 – Componentes fabricados na indústria automotiva de ferro fundido cinzento.

Para a escolha de um material para a indústria automotiva, são observadas características tais como: peso, resistência mecânica, custo do material, considerações ambientais e custo de usinagem. Nestes critérios, o ferro fundido vermicular possui as melhores propriedades, mas apresenta baixa usinabilidade quando comparado ao ferro fundido cinzento, o que pode limitar sua aplicação (Marquard, Helfried e McDonald, 1998).

Por estes motivos, a usinagem do ferro fundido vermicular passou a ser investigada intensamente desde 1995, sendo a Alemanha o país que possui os principais centros de pesquisa do assunto atualmente (Dawson *et al*, 1999).

Na usinagem, o processo de furação é um dos mais utilizados para fabricação de componentes na indústria manufatureira. No Brasil, as brocas helicoidais de aço-rápido com ou sem revestimento estão presentes em mais da metade das operações de furação (Diniz, 2003). Na furação a dificuldade para remoção de cavaco está diretamente relacionada à profundidade do furo no sentido de, quão maior for, mais difícil será o processo. Neste sentido, o uso dos meios lubri-refrigerantes nos processos fechados, como a furação, é fundamental devido à dificuldade de remoção dos cavacos (Queiroz, Boehs e Sant'anna, 1999).

A utilização dos meios lubri-refrigerantes pela indústria no processamento de metais está diretamente ligada à necessidade de minimizar o calor gerado e lubrificação nas operações de usinagem. Os meios lubri-refrigerantes têm como função básica auxiliar o processo de usinagem no controle de temperatura, com o aumento da refrigeração do sistema e do aumento da lubrificação na região de corte. Além disso, os meios lubri-refrigerantes auxiliam na remoção de cavacos e particulados (Iowa, 2003).

Diante disso o presente trabalho consiste fundamentalmente em avaliar o desempenho dos meios lubri-refrigerantes na furação do ferro fundido vermicular com broca helicoidal e como referência será adotado o processo de usinagem a seco.

Esta pesquisa foi desenvolvida com recursos próprios e da empresa Tupy S.A, e tem como objetivo identificar o tipo de meio lubri-refrigerante que ofereça o maior tempo de vida útil à ferramenta, o melhor acabamento superficial da peça usinada e alcance as tolerâncias requeridas concomitante à minimização do impacto ao meio ambiente.

Assim sendo, este trabalho poderá auxiliar nas pesquisas de ferro fundido vermicular, tornando a Tupy S.A. ainda mais competitiva mundialmente em seu segmento e contribuindo para o estudo dos meios lubri-refrigerantes.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Ferro fundido vermicular (CGI)*

O ferro fundido vermicular, também conhecido como *Compacted Graphite Iron* (CGI), foi descoberto por acaso durante a fabricação do ferro fundido nodular, devido a erros de composição química (ASM, 1996). O CGI tem sido produzido em componentes de geometria relativamente simples há mais de trinta anos; no entanto apenas nos últimos anos as fundições têm empregado essa tecnologia em componentes mais complexos (Dawson, 2000).

O ferro fundido vermicular possui boas características de resistência mecânica, resistência a choques térmicos, condutividade térmica, amortecimento, tenacidade e ductilidade. A junção de características tão importantes, tanto do ferro fundido cinzento, quanto do ferro fundido nodular, atribui ao ferro fundido vermicular uma grande importância para aplicação industrial (Marquard, Helfried e MacDonald, 1998; Wertheim, Layyous e Littlefair, 2004; Jaszczak, 2007).

2.1.1 Considerações microestruturais

A diferença entre os três tipos de ferro fundido – Cinzento, Vermicular e Nodular – consiste na forma da grafita. Ferro cinzento é caracterizado pela grafita na forma lamelar, enquanto no nodular a mesma ocorre em forma de nódulos (Dawson, 2000).

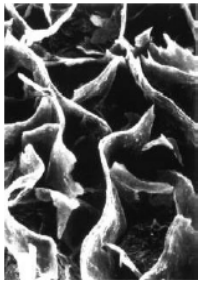
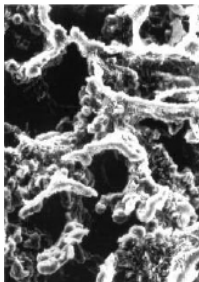
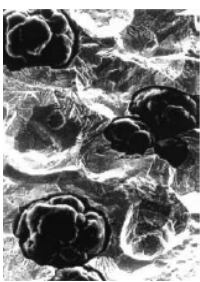
As partículas em grafita de CGI, por sua vez, aparecem individualmente em forma de “vermes”, ou partículas vermiculares. As partículas são alongadas e orientadas aleatoriamente como no ferro cinzento. Entretanto, elas são menores e mais espessas e contêm pontos arredondados. Enquanto as partículas de CGI aparecem em forma de vermes, vistas em duas dimensões, uma análise mais profunda mostra que os vermes individuais são conectados entre si em uma célula eutética (Dawson, 1999; Guessier, Schroeder e Dawson, 2001; Sintercast, 2001).

Esta morfologia de grafita se assemelha a um coral complexo, que juntamente com os cantos arredondados e superfícies irregulares resulta em uma fonte de adesão entre a grafita e a matriz do ferro. A morfologia da grafita compactada inibe o início e o crescimento de trincas, sendo esta característica a fonte de melhoramento das propriedades mecânicas em

relação ao ferro cinzento, juntamente com sua ancoragem na matriz metálica (Dawson, 1999; Sintercast, 2001).

As principais propriedades e características que diferenciam o ferro fundido cinzento, ferro fundido vermicular e ferro fundido nodular são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Propriedades da Grafita: Ferro Fundido Cinzento; Ferro Fundido Vermicular; Ferro Fundido Nodular (David, 2001; Queiroz, Boehs e Sant’anna, 1999; Sahn, Abele e Schulz, 1994).

Propriedade	Cinzento	CGI	Nodular
Resistência à Tração (MPa)	250	450	750
Módulo de Elasticidade (GPa)	105	145	160
Elongação (%)	0	1,5	5
Condutividade Térmica (W/mK)	48	37	28
Dureza (BHN 10/3000)	179 – 202	217 – 241	217 – 255
Resistência à Fadiga (MPa)	110	200	250
Formas Ilustradas de Grafita			

2.1.2 Propriedades do ferro fundido vermicular

As propriedades físicas e mecânicas do CGI são determinadas pela forma e pela razão entre a grafita perlítica e grafita ferrítica (Dawson, 2000).

Os módulos de força de tração e módulo de elasticidade do CGI aumentam gradualmente com o aumento da nodularidade, mas diminuem bastante com o início da formação da grafita lamelar. Dessa forma, a grafita lamelar é inadmissível no CGI. O eixo de nodularização é comprimido na zona da forma lamelar para reproduzir uma rápida transição do CGI para a grafita lamelar por causa do magnésio (Mg). Uma taxa de 5% de nodularidade representa assim um ferro cinzento (Dawson, 2000).

Um dos aspectos mais importantes da estrutura do CGI é o efeito da tensão aplicada nos módulos de elasticidade. Nos ferros cinzentos, o módulo de elasticidade diminui

linearmente na presença de uma carga aplicada. Entretanto, devido à ductilidade do CGI, o módulo de elasticidade permanece constante até certa temperatura dependendo do limite de tensão alcançada. O significado prático disto é que o módulo de elasticidade dos componentes do CGI pode ser de 50 – 75% mais alto que os fundidos de ferro cinzento (Dawson, 2000).

Ao fazer simulações, portanto, deve-se inserir os valores de rigidez apropriados para ambos o ferro cinzento e CGI – como uma função para carregamento – para identificar corretamente as oportunidades de redução de peso e as limitações do desempenho.

2.1.3 Argumentos ecológicos para utilização do ferro fundido vermicular

Tecnicamente já foi comprovada a possibilidade de construir o carro “amigo” do meio ambiente, que forneça boa economia de combustível e baixa emissão. No entanto os fatores limitantes para a produção de tais veículos são os custos, e até agora, pelo menos, a baixa demanda. Existem várias técnicas de engenharia disponíveis para melhorar a economia do combustível. Em função da crise de energia dos anos 1970, os carros têm sido construídos com motores mais eficientes, maiores relações de transmissão e melhor aerodinâmica.

O motor é o único componente do carro que possui relação direta, não somente no peso, mas também no desempenho ambientalista. O mesmo constitui o conjunto mais pesado do carro, e seu peso e localização influenciam fortemente na maioria dos outros parâmetros do projeto, incluindo a escolha do material para os chassis e a carroceria (Würtemberg, 1994).

Nos últimos anos o desenvolvimento dos motores diesel foi auxiliado por legislações referentes aos gases de escape e também pela busca de eficiência em motores cada vez menores. A inovação mais significativa foi a introdução de sistemas que permitem maiores pressões dos cilindros nos injetores a diesel diretos. Isto significa uma combustão mais eficiente, maiores potências por litro, emissões mais reduzidas e motores mais silenciosos. Contudo exige dos munhões do virabrequim uma resistência maior em função da elevada carga mecânica, podendo resultar em uma quebra por fadiga nestas áreas. Portanto, a exigência por materiais mais resistentes, sem aumentar o peso do motor, é cada vez maior.

O CGI, comparativamente com ferro fundido cinzento, possui 80% a mais de resistência à tração, módulo de elasticidade 38% mais elevado e praticamente quase o dobro de resistência à fadiga. Por estes motivos o CGI pode ser crucial para atender as novas exigências dos motores diesel em benefício ao meio ambiente (Würtemberg, 1994).

2.2 *Processo de furação*

A furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria metal mecânica (Diniz, 2003). Possui semelhanças ao processo de torneamento e utiliza ferramentas com geometria definida, denominadas de brocas (Bork, 1995).

No Brasil, as brocas helicoidais de aço-rápido com ou sem revestimento estão presentes mais da metade das operações de furação. Na furação, a dificuldade para remoção do cavaco está diretamente relacionada à profundidade do furo no sentido de, quão maior for, mais difícil será o processo. Tal problema afeta também a refrigeração/lubrificação na região de corte, e muitas vezes são necessárias brocas com canais de refrigeração. O fluido lubri-refrigerante aduzido com pressão passa pelo interior da broca atingindo a região de corte no fundo do furo (Diniz, 2003).

O processo de furação possui algumas particularidades, normalmente é realizado sob condições severas e tais como:

- A velocidade de corte não é uniforme, variando de zero no centro do furo até o máximo na periferia;
- Dificuldade de retirada do cavaco da cavidade;
- Desgaste acentuado nas quinas com canto vivo;
- As guias apresentam desgaste em função do atrito com a parede do furo (König, 1997; Stemmer, 2001).

A furação, de acordo com a norma DIN 8589, é definida como um processo de usinagem com movimento de corte circular, ou seja, com movimento rotativo com o eixo de rotação e avanço coincidentes. As variações mais comuns do processo de furação e as suas direções de movimentos estão ilustradas na Figura 2.1.

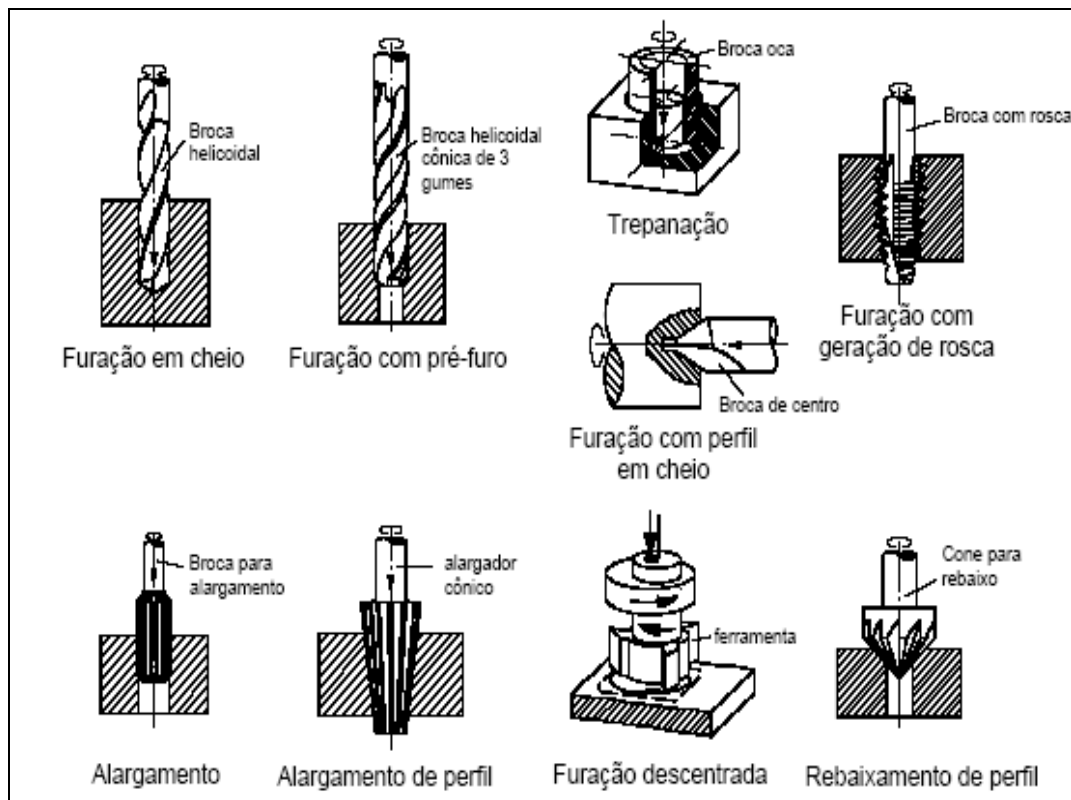


Figura 2.1 - Variantes do processo de furação (Segundo DIN 8589) (König, 1997).

2.2.1 Brocas helicoidais

Para a execução de furos, as brocas helicoidais são as ferramentas mais utilizadas. Apresentam geralmente dois gumes principais, que são ligados ao gume transversal (Stemmer, 1992). Portanto o gume transversal se torna uma parte integrante do gume principal, mesmo que, em decorrência do ângulo de saída negativo, praticamente não apresente um corte e sim deforme o material plasticamente e o extrude na direção das parcelas cortantes do gume principal (König, 1997).

O formato e o ângulo de hélice da broca definem o ângulo de saída, que não é constante ao longo do gume principal. No entanto apresenta o seu valor máximo na quina da broca e diminui no sentido de centro da mesma, tornando-se negativo na passagem para o gume transversal (König, 1997).

A definição das partes das brocas helicoidais está constituída nas normas ABNT NBR 6176 – DIN 1412. Podem existir algumas variações geométricas, tais como ausência de rebaixo, haste cilíndrica ao invés de cônica, existência de canais para refrigeração interna e algumas outras, conforme mostrado na Figura 2.2 (Stemmer 2001).

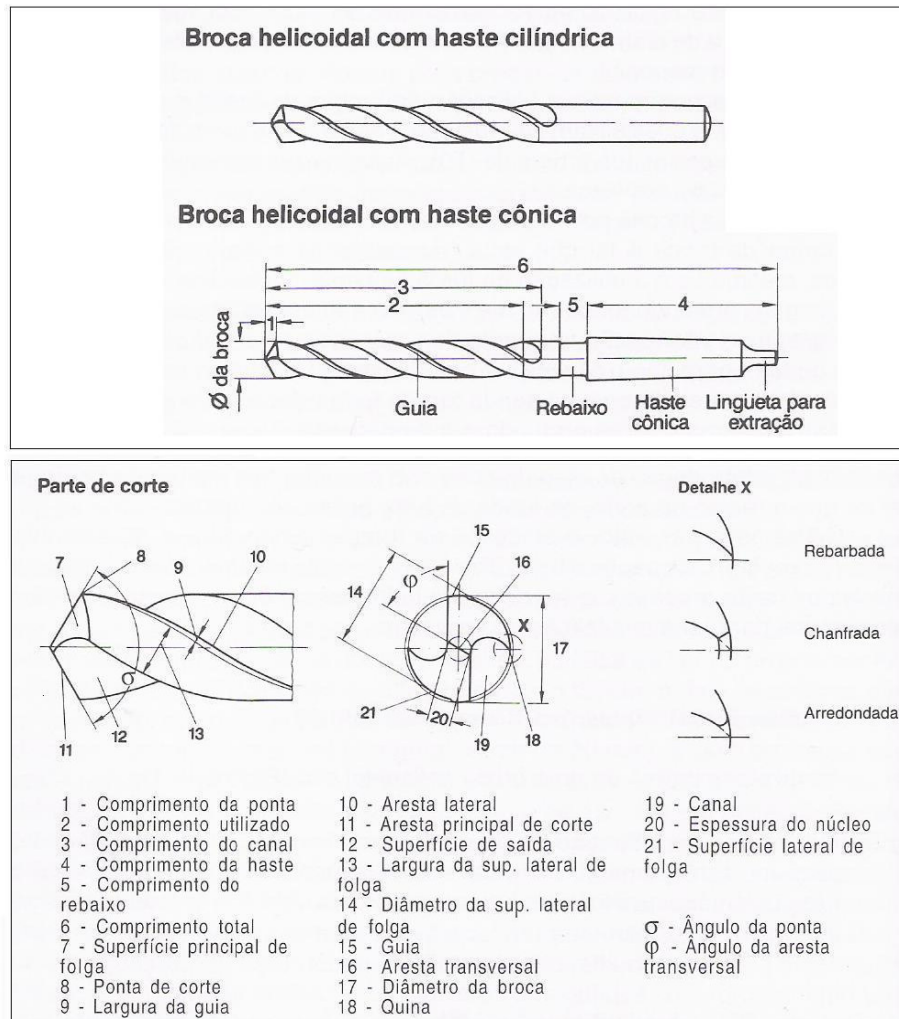


Figura 2.2 - Partes de uma broca helicoidal (Diniz, 2003; Stemmer, 1992).

2.2.2 Parâmetros de corte no processo de furação

Os parâmetros de corte são as grandezas que definem a maneira com que o processo se realiza:

a) Velocidade de corte (v_c)

É a velocidade instantânea do ponto de referência do gume da ferramenta na direção e sentido de corte (Schroeter e Weingaertner, 2002). A velocidade de corte está diretamente relacionada com a rotação da ferramenta e diâmetro do furo (Stemmer, 2001). Nos processos que possuem rotação, a velocidade de corte é calculada conforme equação 2.1.

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n / 1000 \text{ [m/min]} \quad (2.1)$$

b) Velocidade de avanço (v_f)

É a velocidade instantânea do ponto de referência do gume, segundo a direção e sentido de avanço. O cálculo se define pela equação 2.2 (Schroeter e Weingaertner, 2002):

$$v_f = f \cdot n \text{ [m/min]} \quad (2.2)$$

c) Velocidade efetiva de corte (v_e)

Velocidade instantânea do ponto de referência do gume da ferramenta segundo a direção efetiva de corte. A velocidade de corte está relacionada com o diâmetro do furo e com a rotação da ferramenta, e mantém uma relação direta com o material usinado, vida da ferramenta, tempo de usinagem, acabamento superficial e a potência consumida pela máquina-ferramenta (Schroeter e Weingaertner, 2002; Stemmer, 2001).

d) Espessura de usinagem (h)

A espessura de usinagem é proporcional ao avanço e é medida perpendicular ao gume, conforme a equação 2.3:

$$h = f/2 \cdot \text{sen}(\sigma/2) \quad (2.3)$$

e) Profundidade de corte (a_p)

Conforme a Figura 2.3, a profundidade de corte é a profundidade de penetração das guias da broca, desconsiderando a ponta da ferramenta. Equivalente à metade do diâmetro da ferramenta (Diniz, 2003).

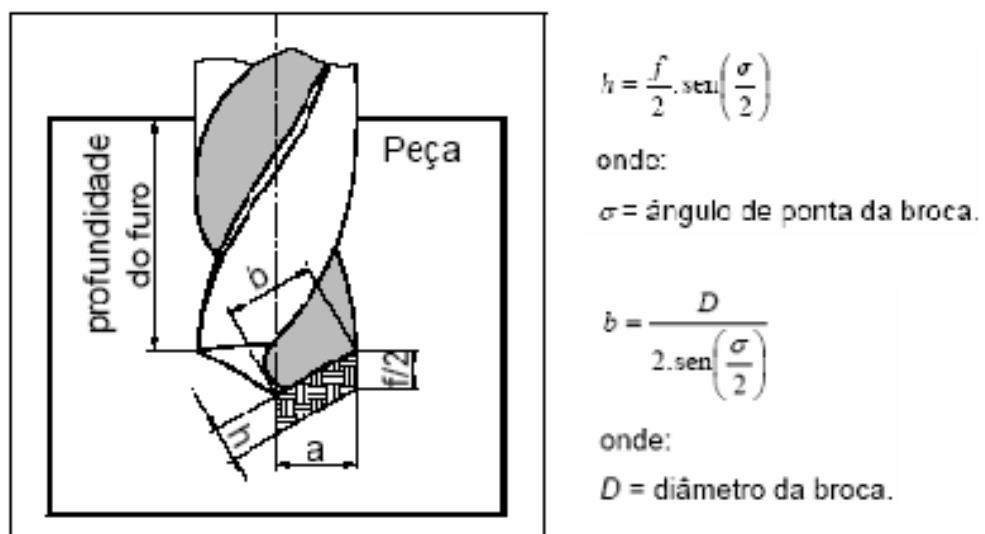


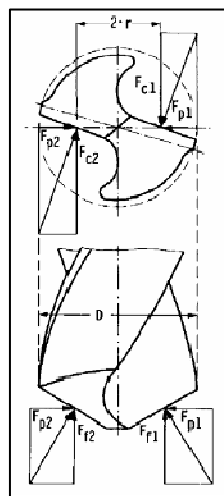
Figura 2.3 - Grandezas de corte no processo de furação (Schroeter e Weingaertner, 2002)

f) Largura de usinagem (b)

A largura de usinagem corresponde ao comprimento de cada gume principal para o caso de furação em cheio.

2.2.3 Forças de corte em furação

Na furação com brocas helicoidais as forças de corte são representadas conforme ilustrado na Figura 2.4, sendo que as forças de corte variam com os ângulos das ferramentas.



F_c : Força de corte

F_f : Força de avanço

F_p : Força passiva

D : Diâmetro da broca

r : Distância do ponto de atuação da força ao eixo da broca

Furação em acabamento : $r = 0,38 \cdot D/2$ *

Furação (com furo guia) : $r = 0,51 \cdot D/2$ *

Furação : $r = (D + d) / 4$

* Segundo: Spur

Figura 2.4 – Forças na broca helicoidal (Schroeter e Weingaertner, 2002).

Na furação, a força de usinagem resultante (F), atuante em cada um dos gumes da ferramenta pode ser dividida em:

a) Força principal de corte (F_c)

Determina a componente de força atuante na face da ferramenta, normal ao gume na direção do movimento (Trent, 2000);

b) Força de avanço (F_f)

Determina a componente de força na direção do avanço (Trent, 2000);

c) Força passiva (F_p)

Determina a componente que tende a empurrar a ferramenta na direção radial (Trent, 2000).

2.3 Formação dos cavacos

A geometria e a forma com que se formam os cavacos são fatores cruciais principalmente em processos que apresentam um volume de espaço pequeno em função do grande volume gerado dos mesmos, como por exemplo, a furação.

As principais influências sobre a formação de cavaco são as condições de corte e a geometria da ferramenta. Em função da diminuição da deformabilidade do material da peça ou pelo aumento da deformação do cavaco pode resultar uma quebra ideal do cavaco. Considerando que a deformação do material está diretamente vinculada à temperatura na região de corte, uma redução da velocidade de corte ou a refrigeração da região de corte resultam em cavacos mais quebradiços (Schroeter e Weingaertner, 2002).

2.3.1 Tipos dos cavacos

a) Cavaco contínuo

Devido à ductilidade do material e a alta velocidade de corte o cavaco é formado continuamente, podendo também ocorrer em função de um fluido lubri-refrigerante que seja eficiente durante usinagem a baixas velocidades de corte, porque sua formação está associada a um baixo coeficiente de atrito. Portanto como a velocidade de corte varia muito pouco em função da formação contínua do cavaco, a qualidade superficial é boa (Stemmer, 1995).

b) Cavaco Cisalhado

O material fissa no ponto mais solicitado, podendo ocorrer ruptura parcial ou total do cavaco. A soldagem dos diversos pedaços de cavacos é devida à alta pressão e temperatura formada na região. A qualidade superficial é inferior à obtida com cavaco contínuo, devido à variação da força de corte. Tal força cresce com a formação do cavaco e diminui bruscamente com sua ruptura, gerando fortes vibrações que resultam numa superfície com ondulosidade (Stemmer, 1995).

c) Cavaco arrancado

Este cavaco rompe em pequenos segmentos, ocorre em materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, como por exemplo: os ferros fundidos, devido à presença de grafita (König, 1997).

d) Cavaco lamelar

Ocorre quando a capacidade de deformação do material é menor do que o grau de deformação no plano de cisalhamento e menor do que a energia de deformação por cisalhamento. Estrutura irregular do material usinado e vibrações, que conduzem a variações na espessura do cavaco, podem causar cavacos do tipo lamelar (König, 1997).

2.3.2 Formas dos cavacos

No processo de furação, o cavaco normalmente assume as seguintes formas:

- Cavaco helicoidal cônico (longo ou curto);
- Cavaco helicoidal (ou fita retorcida);
- Cavaco em vírgula;
- Cavaco em lascas e pedaços (Bork, 1995).

A Figura 2.5 mostra diversas formas de cavacos e suas designações.

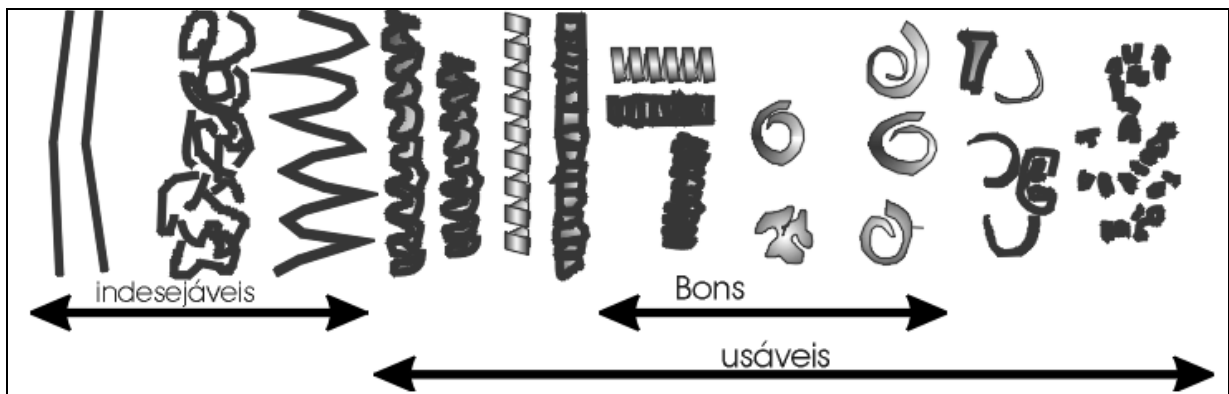


Figura 2.5 – Formas de cavacos e sua classificação (König, 1997).

2.4 Desgastes das ferramentas

2.4.1 Tipos de desgastes em brocas e critério de fim de vida

Vida de uma ferramenta é a denominação para o tempo efetivo entre duas afiações sucessivas, sem considerar os tempos passivos. A perda da capacidade de corte é indicada através de um determinado grau de desgaste, determinando a troca de ferramenta da máquina quando, por exemplo:

- Receia-se uma quebra do gume cortante da ferramenta;
- O gume da ferramenta estiver danificado;
- O desgaste da superfície de incidência da ferramenta não permite que as tolerâncias exigidas na peça não sejam alcançadas;
- Acabamento superfície da peça usinada está fora do especificado;
- Em virtude dos desgastes elevados da ferramenta, a força de usinagem tende a aumentar interferindo no funcionamento da máquina (Ferraresi, 2003).

O fim de vida de uma broca é atingido quando esta apresenta um elevado desgaste em uma ou mais de suas partes consideradas vitais para o processo de usinagem. Através de pré-ensaios, pode-se determinar qual o tipo de desgaste que mais contribui para a redução da vida da broca. Os principais tipos de desgaste observados em:

a) Desgaste de flanco (VB)

O desgaste que ocorre ao longo dos gumes principais da broca. Este tipo de desgaste da broca é o resultado da média entre a largura média de desgaste ($VB_{méd}$) e da largura máxima (VB_{max}) conforme indicado na Figura 2.6 (Bork, 1995).

As medições sempre devem ter como referência o gume da broca enquanto nova, caso contrário durante a usinagem o gume desgastado deixa de ser uma referência (Bork, 1995).

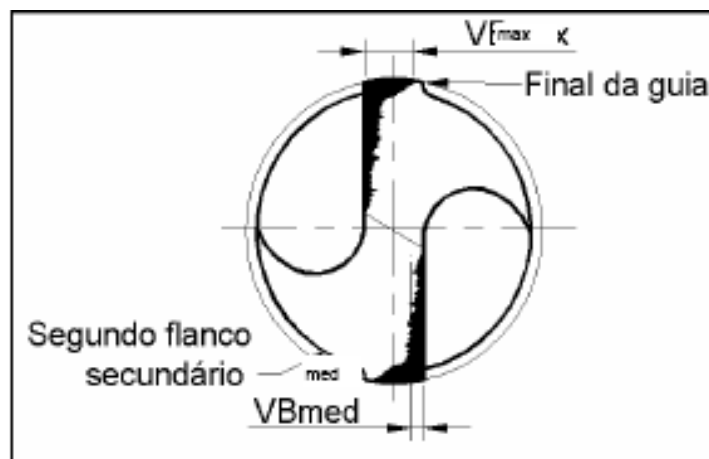


Figura 2.6 - Medição de desgastes de flanco (Bork, 1995).

b) Desgaste das Guias (H)

O desgaste das guias é medido a partir da quina da broca, conforme Figura 2.7 (Bork, 1995).

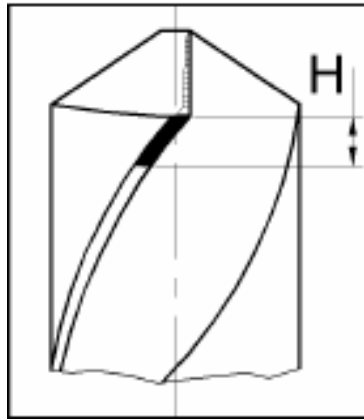


Figura 2.7 - Posição para medição do desgaste em guias (Bork, 1995).

c) Desgaste de Cratera (K_b)

Este desgaste é localizado nas faces da broca, caracterizado pela distância K_b , medida entre a posição original do gume e a borda da cratera mais distante, como demonstra na Figura 2.8 (Bork, 1995).

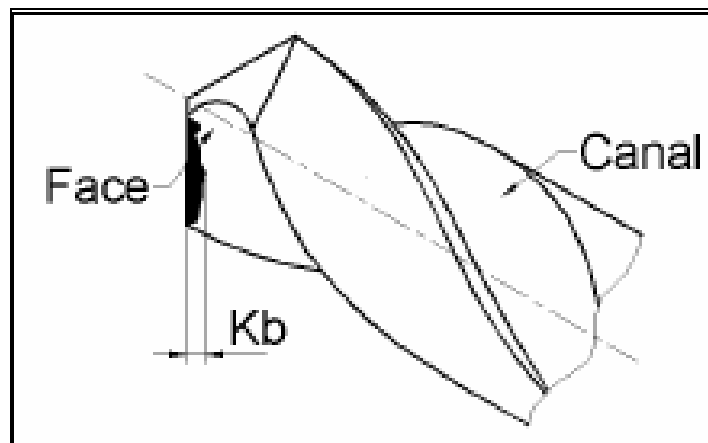


Figura 2.8 - Desgaste de cratera em brocas (Bork, 1995).

d) Lascamento dos Gumes

São caracterizados pelas dimensões P_t e P_m como indicado pela Figura 2.9 (Bork, 1995).

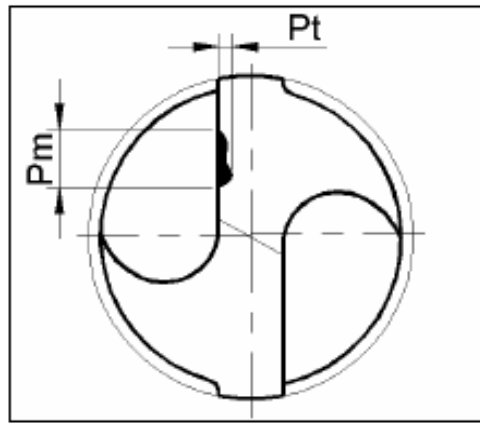


Figura 2.9 - Lascamentos no gume principal da broca (Bork, 1995).

e) Arredondamento das quinas

Caracterizado pelo arredondamento da quina da broca, independentemente se foi afetada toda quina (Bork, 1995). Em geral, é o resultado da combinação dos desgastes de flanco e guia.

f) Colapso total

Constitui-se na destruição ou inutilização da broca. Durante a usinagem o colapso total pode ser reconhecido pelo brusco aumento de potência de corte ou pela mudança do som de corte.

2.4.2 Mecanismos de desgaste

O desgaste pode ser definido como perda do material pela ação entre a peça e a ferramenta e entre o cavaco e a ferramenta em função das solicitações mecânicas, térmicas e químicas. Os principais mecanismos que influenciam o desgaste das ferramentas estão ilustrados na Figura 2.10.

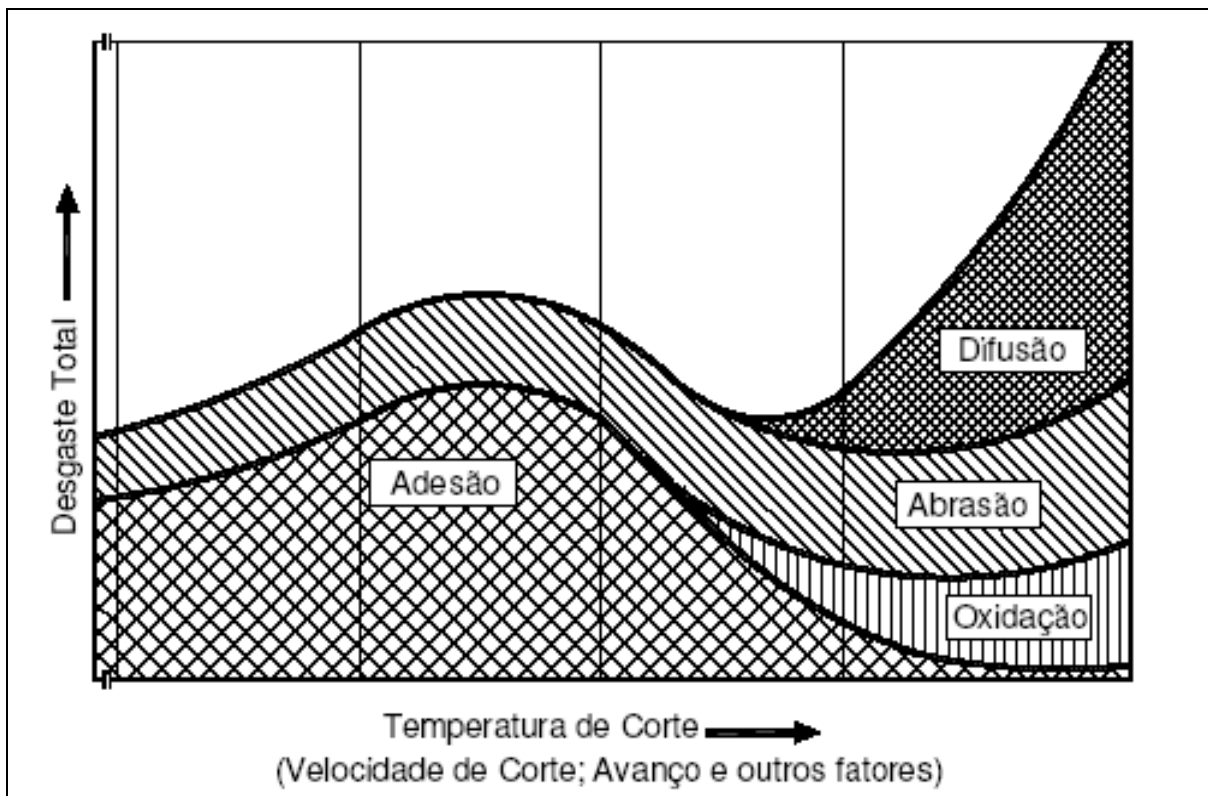


Figura 2.10 – Causas de desgaste na usinagem (König, 1997).

A Figura 2.11 mostra os mecanismos de desgaste que podem apresentar sinais típicos de desgastes, tais como desgaste de cratera, desgaste de flanco, lascamento de várias dimensões ou deformações plásticas. Desgastes e sobrecargas mecânicas nos gumes das ferramentas de corte podem ser gerados por solicitações mecânicas, térmicas e tribológicas decorrentes dos processos de usinagem (Bunshah, 2001).

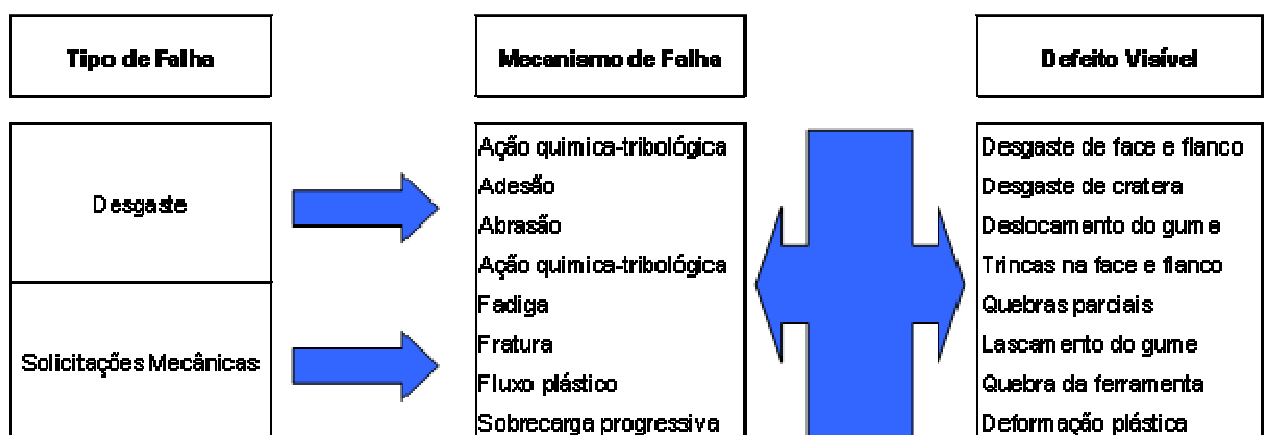


Figura 2.11 – Falhas em ferramentas de corte (Bunshah, 2001).

2.5 Revestimentos para Ferramentas de Usinagem

No atual estágio da tecnologia de fabricação, onde se objetivam a alta produtividade e baixos custos, os revestimentos de ferramentas são indispensáveis à obtenção de bons resultados (Abele e Dörr, 2002).

Tais revestimentos trazem efeitos positivos devido à menor geração de calor, menores esforços de corte, menor tendência à adesão do material da peça, aumento da dureza superficial da ferramenta e redução do mecanismo de difusão em função à barreira térmica imposta pelo revestimento, entre outros (Yuhara, 2000).

Os principais tipos de revestimentos são listados abaixo:

a) Carboneto de titânio (TiC)

Material duro que fornece resistência ao desgaste por abrasão. Sendo quimicamente inerte, forma uma barreira térmica e química entre o cavaco e a ferramenta. Devido à diminuição do atrito e menor condutividade térmica há uma redução na temperatura no gume, diminuindo a difusão. Leva a forças de avanço e passivas menores, porém a força de corte é a mesma se comparada com uma ferramenta não-revestida. A espessura do revestimento varia entre 4 a 8 μm , possuindo coloração cinza escuro (König, 1990).

b) Nitreto de titânio (TiN)

A economia e o aumento de produtividade alcançados com o revestimento de TiN têm sido significativos, podendo em certos casos aumentar a vida da ferramenta em 800%. O revestimento de TiN foi um dos primeiros a ser inventado e é o mais utilizados hoje em dia. As fresas para acabamento podem usinar com maiores velocidades e avanços que as ferramentas não revestidas. O TiN facilita a saída do cavaco, diminui a temperatura gerada na remoção do material e a formação do gume postiço. As fresas revestidas podem durar até 5X mais que as não revestidas, podendo muitas vezes serem revestidas novamente [3]. O nitreto de titânio não é um material tão duro, mas apresenta um coeficiente de atrito menor e com isso uma maior resistência ao desgaste de cratera. Apresenta uma cor dourada, sendo aplicado em temperaturas não muito elevadas, influenciando pouco o substrato. As espessuras variam entre 5 a 7 μm , podendo em alguns casos chegar a 15 μm . Possui uma alta ligação interna, por isso é mais estável quimicamente. A tendência à difusão com o ferro é menor. O desgaste abrasivo no flanco diminui com o aumento de nitreto de titânio (Stemmer, 1993).

c) Carboneto de titânio e alumínio (TiAlN)

Pertence ao grupo de materiais metálicos duro, onde o AlN pode ser ligado a um metal-duro covalente. Comparado ao TiN, apresenta maior resistência à oxidação. Devido à formação de uma camada superior densa de Al_2O_3 , aumenta a resistência à difusão e

oxidação do filme (TiNAl), aumentando sua dureza até mesmo em temperaturas elevadas. Para aplicação sem fluido de corte ou na forma de névoa, tem-se a possibilidade de utilização de revestimento múltiplo. Combina-se uma camada dura de TiNAl, com uma mole e lubrificante de WC/C a qual apresenta média dureza e baixo coeficiente de atrito. A utilização desta combinação melhora a saída do cavaco (menor atrito) reduzindo a força de corte. O TiNAl é depositado por arco e o WC/C por bombardeamento. O TiNAl (extremamente duro e estável termicamente) protege os gumes solicitados severamente contra o desgaste e temperaturas elevadas. O TiNAl é depositado principalmente pela evaporação do alvo de TiAl utilizando o nitrogênio com gás reativo. O WC/C apresenta baixos valores de desgaste em longos períodos de tempo (König, 1990; Teeter, 1999).

d) Carbonitreto de titânio (TiCN)

A espessura de revestimento com o TiCN chega a ser de 0,002mm. Este tipo de revestimento fornece dureza e resistência ao desgaste excepcionais, superando o desempenho do TiN em aplicações onde o avanço e a velocidade de corte são severos. Isto ocorre na usinagem de materiais abrasivos ou de corte difícil. Pode-se usinar materiais como aço carbono, alumínio, aço inoxidável, aço de matrizes e materiais abrasivos como ferro fundido, bronze e ligas de silício-alumínio. Com estas ferramentas pode-se usinar de forma severa e chegar a alta qualidade superficial. Este elemento forma uma boa combinação com outro que fornece uma barreira térmica estável como o óxido de alumínio. O substrato deve ter a ductilidade correta e ser complementado pelo revestimento para obter dureza e proteção (König, 1990; Stemmer, 1993).

e) Óxido de alumínio (Al₂O₃)

É o mais frágil de todos os materiais duros, porém apresenta elevada dureza a quente e resistência à oxidação. Oferece excelente resistência ao desgaste de cratera, mas tem baixa resistência a oscilações de temperatura. É transparente (König, 1990; Stemmer, 1993).

f) Bisulfeto de molibidênio (MoS₂)

Este revestimento também conhecido como Movic® é empregado na usinagem em alta velocidade a seco ou quase a seco de vários materiais. O Movic é formado por MoS₂ e outros 14 aditivos, reduzindo a 1/6 o atrito no processo quando comparado ao TiN. O MoS₂ pode ser usado com revestimentos duros como TiNAl e TiCN aumenta extremamente a vida da ferramenta em aplicações em aço rápido e ligas de alumínio. O TiNAl é indicado especificamente para usinar materiais abrasivos, como ligas de alumínio com alto teor de

silício e ferro fundido. O TiCN é utilizado para usinar materiais muito duro e materiais de usinagem difícil, este revestimento combina o baixo atrito do TiN com a dureza e a capacidade de dissipação do calor do carbono. Isto aumenta dramaticamente a vida da ferramenta na furação de aço-ferramenta e aços com dureza superior a 40HRC. O revestimento macio cobre o duro, agindo como uma barreira térmica entre o cavaco e a ferramenta prevenindo o sobre aquecimento. Segundo o Dr. Tibor Cselle que patenteou o Movic, combinando este com carbonetos pode-se concorrer com o Cermet a menor custo. O Movic (MoS₂) adere como o Teflon na ferramenta, criando uma superfície de baixo atrito (Lewis, 1997).

2.6 *Qualidade no processo de furação*

São muitos os fatores que influenciam na precisão de qualquer furo produzido pela furação, tais como:

- O processo utilizado;
- A peça e a máquina usadas;
- Parâmetros de usinagem;
- Rigidez do conjunto utilizado e
- A geometria da ferramenta que também influencia na precisão do furo.

Em função das muitas variáveis, é praticamente impossível especificar a precisão de furos. Nas máquinas onde são utilizadas buchas de furação, a precisão da broca em si, em relação ao diâmetro e circularidade não é tão crítica, mas é extremamente importante em operações em máquinas de comando numérico ou outras máquinas de precisão. Em algumas operações de precisão certas vezes é necessário efetuar uma nova afiação na brocas padrão. No entanto, uma afiação inadequada pode produzir um desbalanceamento das forças que poderá causar deflexão na broca e gerar possíveis erros no furo.

2.6.1 Erros comuns na geometria do furo

Em qualquer processo de furação, imperfeições ou certos erros podem ocorrer em vários graus, devidos a causas comuns conforme ilustrado na Figura 2.12.

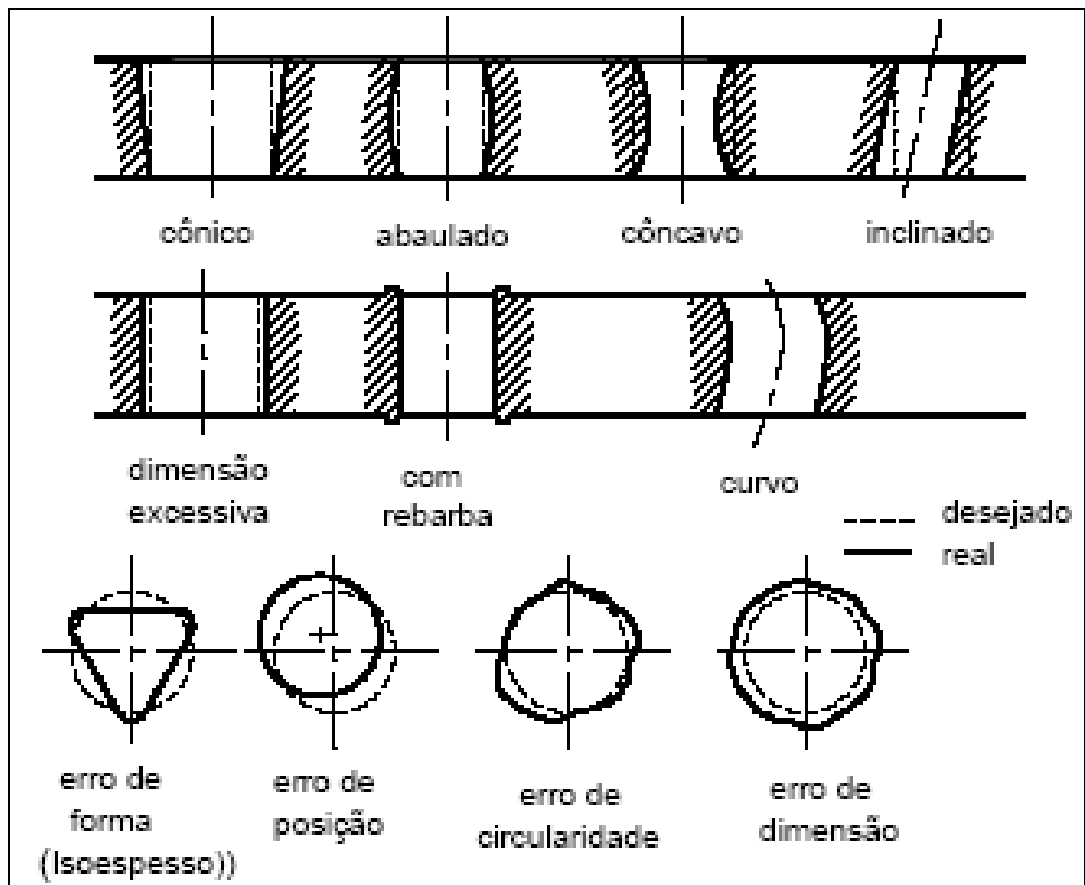


Figura 2.12 – Erros comuns no processo de furação (König, 1997; Wick, 1988)

a) Erros de forma

Esta condição existe quando o diâmetro não é uniforme ao longo do comprimento do furo. O diâmetro e o comprimento do furo (relação l/d) são os principais agravantes para este erro (Schroeter e Weingaertner, 2002).

b) Rebarba

As rebarbas podem ser geradas na borda do furo, tanto na entrada como na saída. A forma e a dimensão das rebarbas dependem dos materiais da peça e da ferramenta, de suas propriedades, das condições das ferramentas, da velocidade de corte, avanço e a composição do fluido refrigerante (Stemmer, 1993).

c) Erros de posicionamento dos furos

A precisão da posição do furo depende primeiramente da condição da máquina e da ferramenta (crucialmente na ponta da ferramenta), erros ocorrem quando o centro do furo está deslocado em relação à posição em que deveria estar.

d) Erros de circularidade

Ocorrem quando a seção circular de um furo é distorcida em relação à forma ideal. Formas tais como triangular, irregular ou oval são comumente observadas. A precisão dos mancais do fuso e a afiação da ferramenta são essenciais para a minimização destes erros. O erro de circularidade pode ser também reduzido aumentando a taxa de avanço e usando uma ferramenta com um corpo rígido (Wick, 1988).

e) Erro de cilindridade

É uma característica geométrica com uma tolerância entre dois cilindros que possuem características geométricas coaxiais e é considerada como correto se a diferença entre as distâncias radiais for igual ou menor do que a tolerância especificada (Mitutoyo, 2005).

2.6.2 Qualidade da superfície na furação

As superfícies de uma peça, quando observadas em um microscópio, permitem a visualização de regiões com maiores ou menores irregularidades, que são definidas como sendo rugosidade da peça mesmo que essas, num aspecto macroscópico, pareçam perfeitamente lisas (Schroeter e Weingaertner 2002). Portanto rugosidade é o conjunto de irregularidades da superfície real em relação à superfície técnica ou de referência, conforme ilustrado na Figura 2.13.

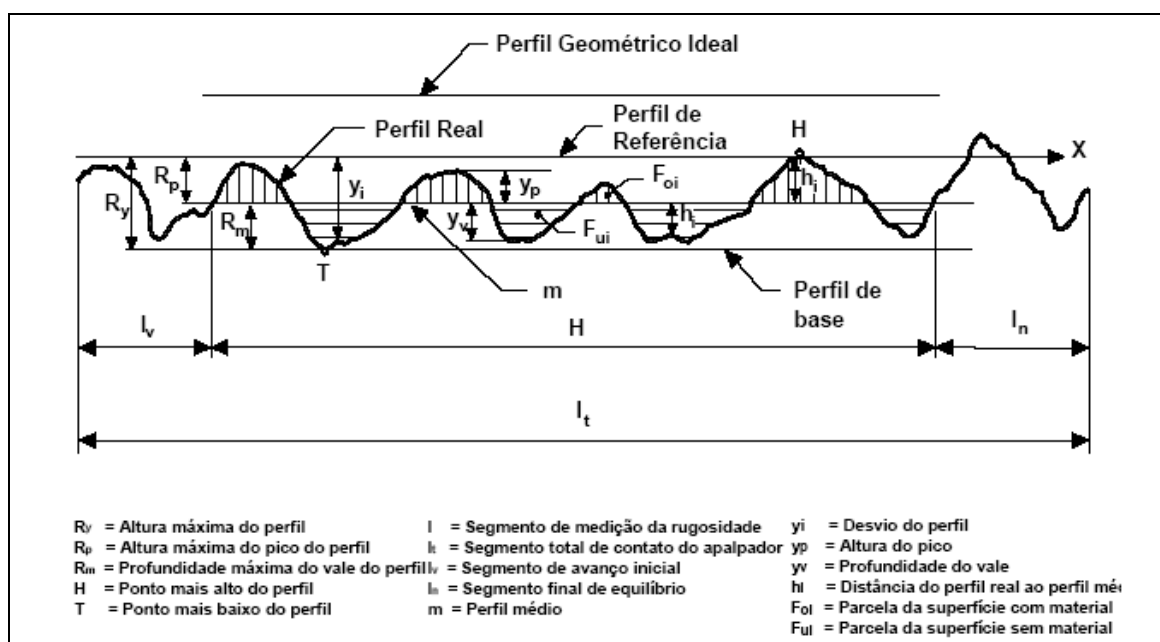


Figura 2.13 – Conceitos básicos na avaliação de superfícies (König, 1997).

a) Rugosidade R_a

É definida através da equação 2.1, conforme ilustrada abaixo, como a média aritmética dos valores absolutos das variações do perfil real em relação à linha média. Este parâmetro tem a desvantagem de não informar a ordem de grandezas dos diferentes valores locais da rugosidade sobre o perfil analisado (König, 1997; Castillo, 2005).

$$R_a = \frac{1}{l} \int_{x=0}^{x=l} |h_i| \cdot dx \quad (2.4)$$

b) Rugosidade R_z

Define-se como profundidade média de rugosidade R_z a distância média entre os cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos, dentro de um comprimento médio medido (König, 1997; Castillo, 2005), conforme equação 2.2 abaixo:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 P_i + \sum_{i=1}^5 v_i \right) \quad (2.5)$$

c) Rugosidade R_y

É a distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo, dentro de um comprimento medido de um perfil de rugosidade (König, 1997; Castillo, 2005).

d) Rugosidade R_t

É definida como a profundidade máxima de rugosidade R_t , que é o valor do afastamento do perfil de base ao perfil de referência, sendo a maior distância medida perpendicularmente ao perfil geométrico ideal (König, 1997; Castillo, 2005).

2.7 Usinabilidade

O termo usinabilidade compreende as propriedades de um material que têm influência sobre o processo de usinagem. Portanto, com o termo usinabilidade são descritas todas as

dificuldades que um material apresenta no processo de usinagem. Geralmente são usados quatro critérios para avaliar a usinabilidade:

- Vida da ferramenta;
- Forças de usinagem;
- Qualidade superficial da peça;
- Forma dos cavacos (König, 1997).

2.7.1 Características de usinabilidade de ferros fundidos

Segundo König (1977) as características de usinabilidade dos ferros fundidos variam conforme a quantidade e forma da grafita. A presença da mesma reduz o atrito entre ferramenta e peça, diminuindo a estrutura básica metálica. Consequentemente gera uma melhor usinabilidade comparando-se aos aços e ferros fundidos sem grafita.

Não só a grafita, mas a estrutura básica metálica dos ferros fundidos também exerce uma grande influência na usinabilidade. Naqueles possuem maior resistência e dureza caracterizam-se predominantemente pelo aumento do teor de perlita, e com isso normalmente apresentam uma péssima usinabilidade.

2.7.2 Usinabilidade de Ferro Fundido Vermicular

Por apresentar maior resistência à tração (75%) e maior tenacidade (30 – 40%) em relação ao ferro fundido cinzento, o ferro fundido vermicular é mais difícil de ser usinado (Dawson, 1995). Na usinagem em alta velocidade (cerca de 1000 m/min), o quadro se agrava ainda mais; somente na região de baixa velocidade de corte (aproximadamente 300 m/min) é possível obter um acabamento similar ao ferro fundido cinzento (Luempic e Henkel, 2000).

Dois pontos críticos para a usinabilidade do CGI são a consistência da microestrutura e o controle da nodularidade. Para que haja boa usinabilidade, é necessário que as partículas de grafita apresentada como nódulos não ultrapassem o índice de 20% nas áreas a serem usinadas. Em contrapartida, nas paredes externas que não são usinadas, a nodularidade mais alta é responsável por garantir maior resistência às mesmas. No sentido de controlar a nodularidade, o ferro fundido vermicular é frequentemente produzido com 0,1 a 0,2% de titânio. Estudos mostram que a produção de CGI sem titânio torna a usinabilidade igual ou até superior a dos ferros cinzentos (Dawson, 1995).

O titânio está normalmente presente nos ferros fundidos em teores que variam de 0,005 a 0,02%. Dawson *et al* (2001) citam que, para os ferros fundidos vermiculares, tal quantidade gira

em torno de 0,01% e pode levar à formação de inclusões com dureza maior até do que certos materiais de corte.

Além disso, a maior dificuldade na usinabilidade em comparação ao ferro fundido cinzento consiste no tratamento com magnésio que recebe o ferro fundido vermicular e na quantidade reduzida de enxofre que possui. A quantidade menor desse elemento justifica a ausência da camada de Sulfeto de Manganês (MnS_2) na usinagem do CGI. Tal camada, cuja espessura é diretamente proporcional ao aumento da velocidade de corte e, portanto, ao aumento da temperatura de corte, age como uma proteção às ferramentas. Este fato explica a diferença na vida útil das mesmas na usinabilidade de ambos os ferros, conforme ilustrado na Figura 2.14 (Andrade, 2005).

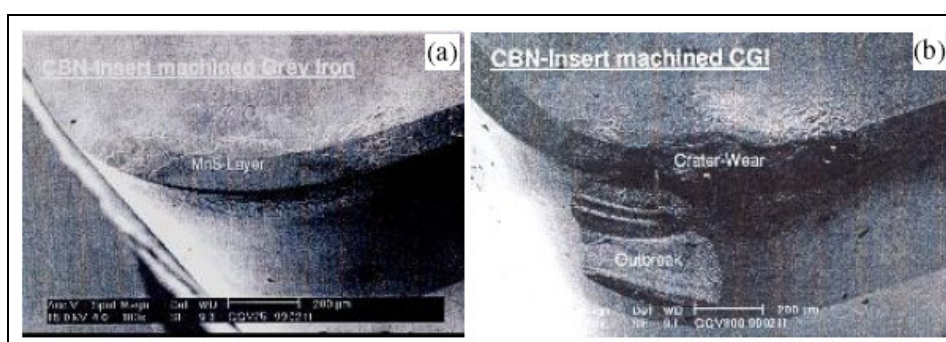


Figura 2.14 - Presença de MnS_2 como camada protetora ao gume da ferramenta de PCBN na usinagem do ferro fundido cinzento (a); Ausência da camada de MnS_2 no gume durante a usinagem do ferro fundido vermicular (b) (Dawson *et al*, 2001; Georgiou, 2002). (a) (b)

Em resumo, a camada de MnS_2 é responsável pela grande diferença de desempenho das ferramentas de corte na usinagem dos dois materiais, devido ao crescimento da espessura da camada em função do aumento da velocidade de corte (Dawson *et al*, 2001 e Georgiou, 2002).

2.7.3 Influência da forma da grafita do ferro fundido vermicular

Dawson *et al.* (2001) estudaram as influências de diversas variáveis metalúrgicas na usinabilidade do ferro fundido vermicular, direcionando principalmente as suas pesquisas sobre a forma da grafita.

A Figura 2.15 (a) ilustra o início de fratura e sua propagação, tornando o ferro fundido cinzento frágil, entretanto a Figura 2.15 (b) mostra a morfologia das grafitas do ferro fundido vermicular que não permite a clivagem e nem a propagação de trincas. Hieber (1994) analisou que a fratura do ferro fundido vermicular se inicia na interface da grafita vermicular/matriz

metálica. Laempic e Henkel (2000) atribuem parte do maior desgaste da ferramenta de corte do ferro fundido vermicular à integração da grafita à matriz metálica.

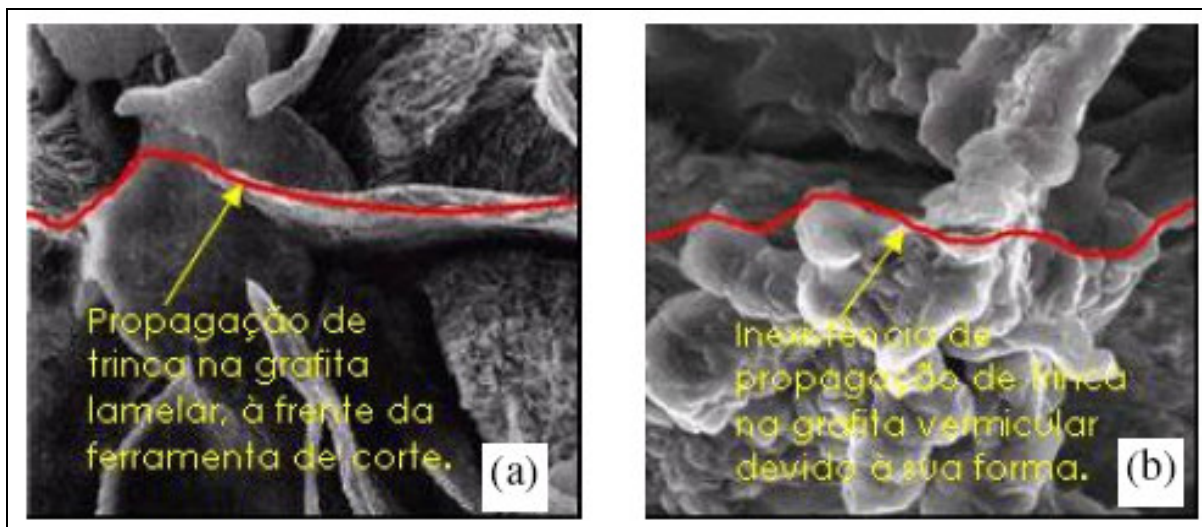


Figura 2.15 – Propagação de trincas na grafita lamelar do ferro cinzento, à frente da ferramenta de corte (a); Dificuldade da propagação de trincas nas grafitas vermiculares devido à sua forma, além do seu entrelaçamento com outras grafitas e com a matriz metálica (b) (Andrade, 2005).

Portanto, grafitas na forma nodular sempre estarão presentes na estrutura do ferro fundido vermicular. Por este fator a resistência mecânica e a tenacidade aumentam, mas a fundição, usinabilidade e condutividade térmica serão prejudicadas (Andrade 2005).

Segundo Schulz e Reuter (2003) na usinabilidade de blocos de motores de CGI, os processos de furação e fresamento tiveram a vida útil das ferramentas reduzidas pela metade do tempo. Com base nestes resultados a introdução do CGI nas técnicas de fabricação de motores se demonstrava não econômica (Schulz e Reuter, 2003).

2.8 Meios lubri-refrigerantes ou fluidos de Corte

De acordo com a literatura técnica, o primeiro a escrever sobre meios lubri-refrigerantes foi W. H. Northcott, que demonstrou o aumento significativo da produtividade no corte de materiais após a utilização dos mesmos, há mais de 100 anos (Schroeter e Waingaertner, 2002; Drozda e Wick, 1983).

O americano F. W. Taylor em 1894 aumentou a velocidade de corte de 30% a 40% sem afetar a vida da ferramenta de corte, adicionando grande quantidade de água durante o

processo de usinagem, com o objetivo de reduzir a temperatura da ferramenta (Schroeter e Waingaertner, 2002; Drozda e Wick, 1983; Sillman, 1992).

Desde então, as pesquisas têm sido cruciais para o desenvolvimento dos meios lubri-refrigerantes, também chamados de fluidos de corte, principalmente após o surgimento de novas ferramentas que permitem as operações com maiores velocidades de corte. Os estudos com as mais variadas combinações de óleos minerais, óleos graxos e aditivos, como enxofre, fósforo e outros, demonstraram a grande importância dos meios lubri-refrigerantes nos processos de fabricação (Schroeter e Weingaertner, 2002; Drozda e Wick, 1983, König, 1999).

O crescimento da utilização dos meios lubri-refrigerantes é proporcional ao aumento de produção. Principalmente com a evolução das pesquisas verificou-se um grande interesse em analisar a real influência dos fluidos de corte na saúde do ser humano e o verdadeiro impacto sobre o meio ambiente (Schroeter e Weingaertner, 2002).

2.8.1 Funções dos meios lubri-refrigerantes

O aumento da tecnologia das máquinas-ferramentas, das ferramentas de corte e do desenvolvimento dos materiais a serem usinados, exigem dos meios lubri-refrigerantes um desempenho cada vez maior (Stemmer, 1993). Portanto o meio lubri-refrigerante tem como função melhorar o processo de usinagem dos metais, e as melhorias podem ser subdivididas em melhorias de caráter funcional ou de caráter econômico (Ferraresi, 2003).

a) Caráter funcional

São as melhorias que facilitam o processo de usinagem focando no desempenho do processo, como:

- Refrigeração da máquina-ferramenta;
- Refrigeração da ferramenta;
- Refrigeração da peça durante a usinagem;
- Redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco;
- Retirada do cavaco da região de corte;
- Melhor acabamento superficial da peça em usinagem (Ferraresi, 2003).

b) Caráter econômico

São as melhorias que possuem um único objetivo, usinagem mais econômica, como:

- Menor consumo de energia de corte;
- Menor custo da ferramenta na operação;
- Garantir a ausência de corrosão da peça em usinagem (Ferraresi, 2003).

2.8.2 As principais funções dos meios lubri-refrigerantes

As principais funções dos meios lubri-refrigerantes é, como o próprio nome permite concluir, a lubrificação e a refrigeração das zonas de corte (Haan *et al*, 1997).

a) Refrigeração

Os meios lubri-refrigerantes removem o calor gerado durante a operação de corte. Este efeito impede que a ferramenta atinja a sua temperatura crítica, acima da qual ela se desgasta rapidamente (Bienkowskib, 1993). As temperaturas envolvidas na área de corte variam consideravelmente. A distribuição típica do calor na ferramenta é ilustrada na Figura 2.16 (Yushiro, 2007).

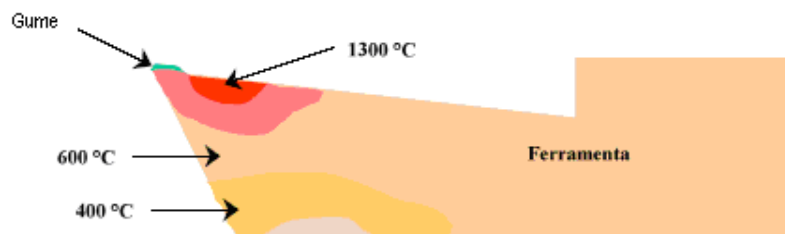


Figura 2.16 – Distribuição das temperaturas numa ferramenta (Yushiro, 2007)

A distribuição do calor gerado entre a ferramenta, a peça e o cavaco que recebe a maior parte do calor gerado na operação de corte está apresentada na Figura 2.17.

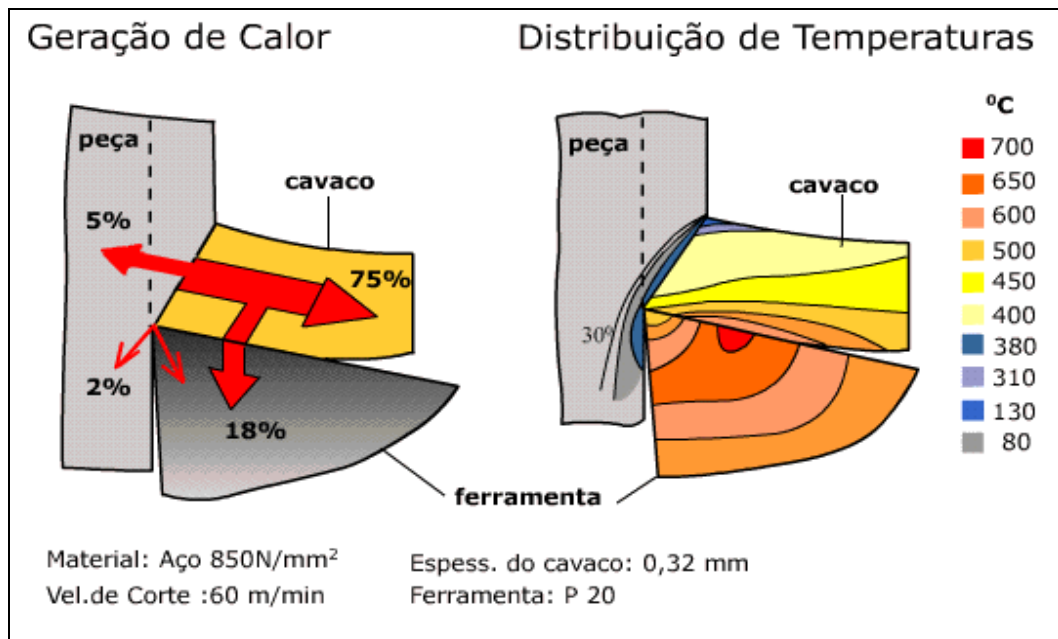


Figura 2.17 – Distribuição do calor entre peça, ferramenta e cavaco (Teixeira, 2001).

As pressões entre a ferramenta e a peça podem chegar a 1.400.000 kPa (Runge e Duarte, 1989). Cerca de 75% é conduzido ao cavaco, e que a temperatura máxima não ocorre no gume da ferramenta, mas sim numa região na face afastada do gume (Teixeira, 2001). Se não houver uma remoção eficiente do calor, poderão ocorrer distorções térmicas nas peças usinadas, desgaste rápido e prematuro em função da destêmpera da ferramenta (Yushiro, 2007; Runge e Duarte, 1989).

O efeito do calor sobre os materiais usados na fabricação de ferramentas pode ser colocado na seguinte ordem crescente de resistência:

- aço carbono;
- aço-rápido;
- ligas fundidas;
- metal-duro;
- cerâmicas;
- diamantes.

A dureza inicial dos materiais utilizados para a fabricação de ferramentas e sua diminuição em relação ao aumento de temperatura é mostrada na Figura 2.18.

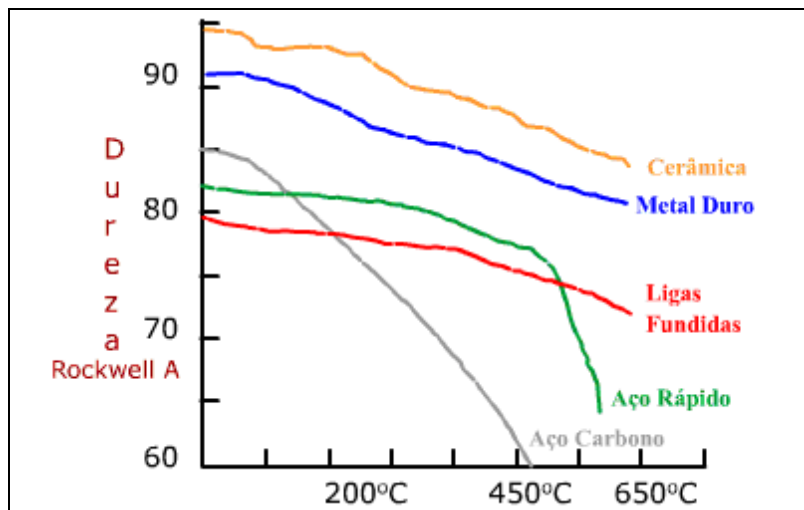


Figura 2.18 - Curvas de perda de dureza em função da temperatura para diferentes materiais de ferramentas (Runge e Duarte, 1989)

Existe uma relação direta entre a vida da ferramenta e a sua temperatura durante a operação de corte. Esta relação é indicada pela expressão:

- vida da ferramenta x temperatura = constante

A constante varia em função do material da ferramenta e da sua forma geométrica (Runge e Duarte, 1989).

b) Lubrificação

Analisando em escala microscópica, sempre haverá asperezas em forma de pico e vales por melhor que seja o acabamento superficial da peça, como mostra a Figura 2.19.

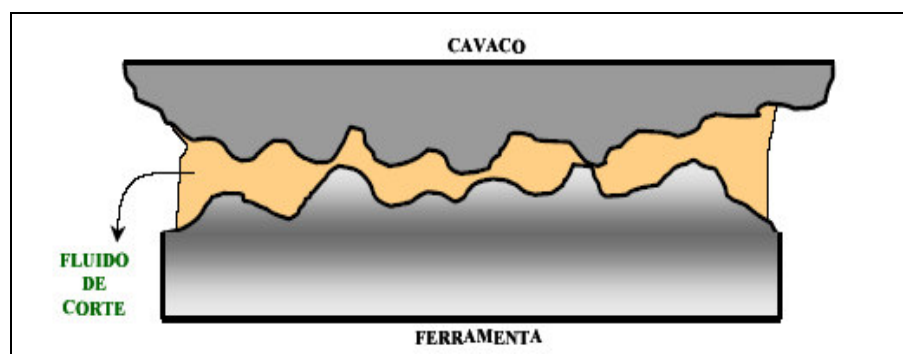


Figura 2.19 – Seção transversal da interface cavaco e ferramenta (Yushiro, 2007).

As pequenas saliências existentes na ferramenta colidem com as saliências existentes nos cavacos, à medida que estes deslizam sobre a ferramenta e, sob as condições de altas

temperaturas e pressões, podem chegar a caldear-se. O constante cisalhamento destas asperezas soldadas resulta em desgaste da ferramenta, principalmente na ponta onde ocorre a concentração do calor. Portanto as partículas do cavaco ligam-se à ponta da ferramenta, resultando frequentemente em um gume postiço (Yushiro, 2007).

O meio lubri-refrigerante penetra entra a superfície da ferramenta e a do cavaco reduzindo o atrito. Em função das reações dos aditivos presentes nos fluidos de corte que formam películas sólidas de baixa resistência ao cisalhamento entre as superfícies em atrito, reduzem-se o consumo de energia e a geração de calor. No entanto podem ser aumentadas as velocidades de corte e de avanço para produzir mais peças entre as afiações das ferramentas (Yushiro, 2007; Aronson, 1994).

Considerando que a dureza a quente dos materiais das ferramentas é o fator significativo de estabilidade, a refrigeração e a lubrificação são fundamentais para aumentar a vida da ferramenta diminuindo seu desgaste (Sluhan, 1994).

c) Remoção de particulados e cavaco

Os meios lubri-refrigerantes removem os cavacos e particulados entre a peça e a ferramenta para impedir quaisquer danos e marcas indesejáveis principalmente na região de corte da peça acabada (Aronson, 1994).

d) Melhorar o acabamento superficial da peça

A vantagem da utilização dos meios lubri-refrigerantes para o melhoramento do acabamento da superfície da peça usinada está na redução de ocorrência de gume postiço. Este é formado por partículas metálicas que aderem ao gume da ferramenta durante o processo de usinagem (Ferraresi, 1977; Tuholski, 1993). Sua formação altera a geometria da ferramenta podendo variar os principais elementos relacionados ao acabamento superficial da peça: ângulo de saída (γ), ângulo de incidência (α), raio da quina (r_ϵ) (Ferraresi, 1977).

A redução de forças, com conseqüente diminuição do nível de vibrações, bem como uma melhor formação do cavaco, também auxiliam na manutenção de boas qualidades da superfície.

2.8.3 Classificação dos meios lubri-refrigerantes e suas vantagens e desvantagens

No mercado existe uma grande variedade de fluidos de corte que estão divididos em quatro classes principais, que são: óleos integrais, óleos emulsionáveis, semi-sintéticos e sintéticos (ASM, 1991). Esta classificação é apresentada na Figura 2.20 abaixo.

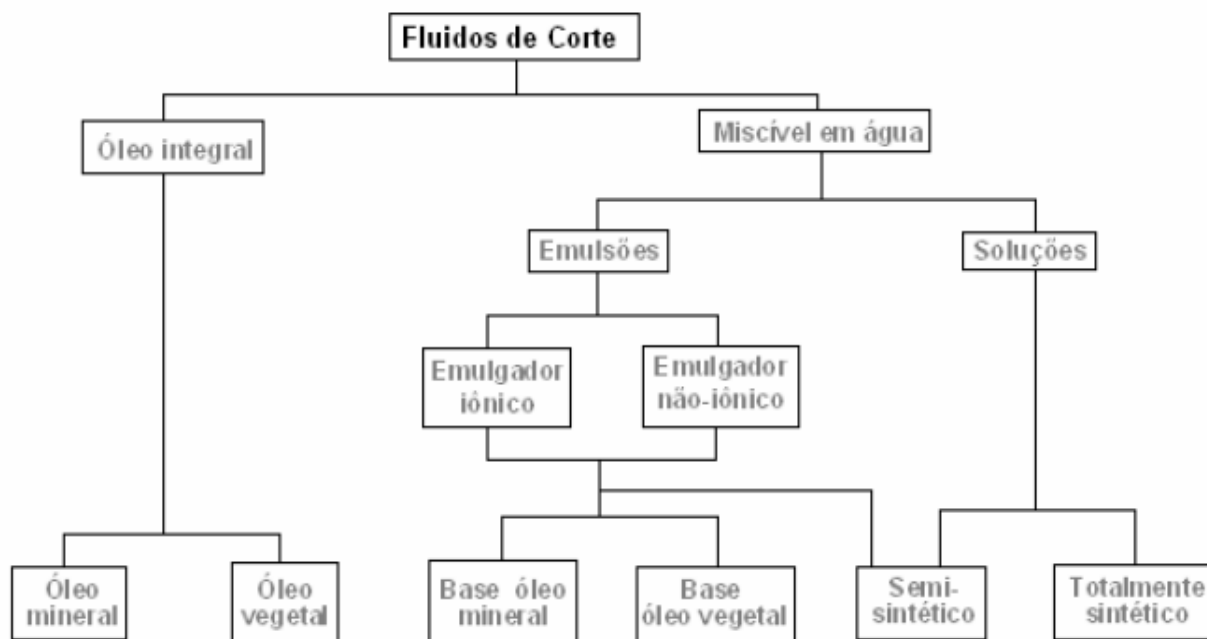


Figura 2.20 – Classificação dos Fluidos de Corte (Gomes, 2005).

a) Óleos integrais

Os óleos integrais são usados principalmente em operações mais severas que requerem maior lubricidade (Sluhan, 1994). Possuem como composto básico o óleo mineral, e podem ser usados no estado puro (sem aditivação) ou aditivado (presença de aditivos polares e/ou aditivos químicos ativos ou inativos) (ASM, 1991). Os óleos graxos de origem animal ou vegetal foram os primeiros óleos integrais, mas em função da rápida deteriorização e alto custo tornaram-se inviáveis (Machado, 1999).

As vantagens destes óleos são que os mesmos possuem propriedades lubrificantes, apresentam um bom controle anti-ferrugem e longa vida útil (ASM, 1991; Bienkowski, 1993).

Pode-se citar como desvantagem destes fluidos que, quando comparados aos fluidos de corte à base de água, o desempenho de refrigeração é menor (ASM, 1991). Normalmente são limitados às operações que requerem baixas velocidades de corte e baixas temperaturas (Aronson, 1994). Além disso, podem gerar névoas que oferecem riscos à saúde do operador e por serem viscosos, deixam filmes oleosos na máquina-ferramenta, ferramenta de corte e na peça, o que encarece o processo de limpeza (Aronson, 1994; Bienkowski, 1993; Foltz).

b) Meios lubri-refrigerantes à base de água

São misturas que variam entre emulsões e soluções dependendo da constituição básica do concentrado (ASM, 1991). Estes fluidos são geralmente formados por óleo mineral, agentes emulsificadores e outros aditivos (IOWA, 1990).

A Figura 2.21 apresenta um esquema que explica o processo para formar solução adequada para uso. A mistura entre a água e o óleo forma duas fases bem distintas (a). A adição de um emulsificador faz com que o óleo permaneça disperso em forma de gotículas (b). Repulsão provocada pelo emulsificador (c). O efeito da dispersão do óleo ocorre na água por causa da repulsão das cargas elétricas negativas provocadas pelo emulsificador em todas as gotículas (d). Molécula de um emulsificador e sua polaridade negativa (e) (IOWA, 1990).

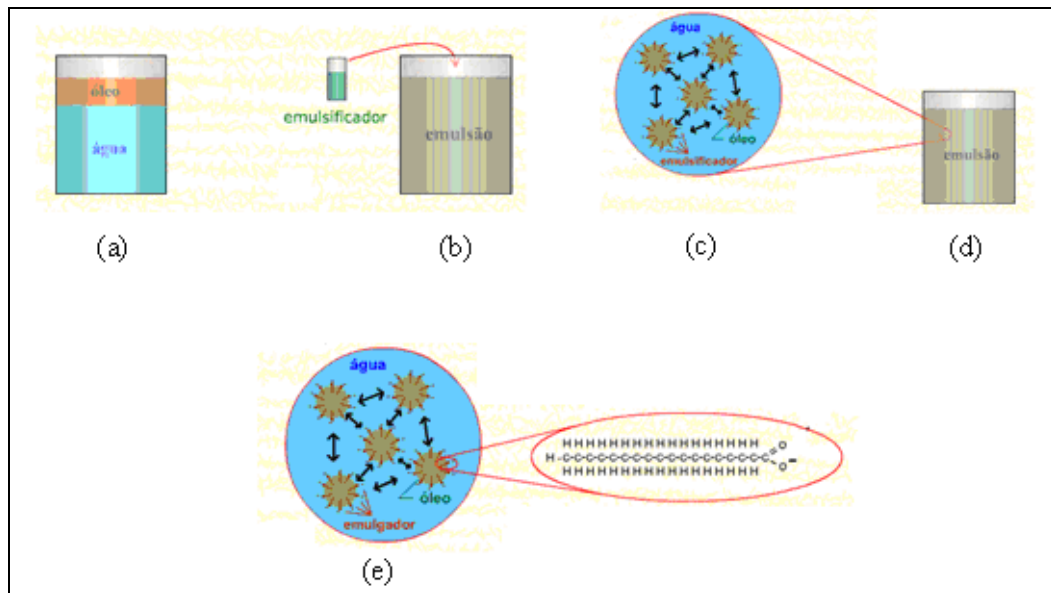


Figura 2.21 – Formação adequada de uma solução do meio lubri-refrigerante (IOWA, 1990).

Este tipo fluido apresenta uma refrigeração eficaz e dependendo da taxa de diluição e da constituição do concentrado do fluido aquoso possui um moderado poder lubrificante (ASM, 1991). Se comparados aos óleos integrais, meios lubri-refrigerantes à base de água geram menos névoa, o que beneficia a segurança e diminui os riscos à saúde do operador (Drozda, 1983). Além disso, este fluido de corte pode ser adaptado a uma variedade de aplicações através de agentes umectantes e aditivos EP (extrema pressão), até mesmo para operações severas (IOWA, 2003).

Porém estes fluidos de corte necessitam de maiores cuidados quanto à qualidade da água utilizada, controle de microorganismos (bactérias e fungos), ao pH e concentração da emulsão (ASM, 1991; IOWA 2003).

c) Óleos semi-sintéticos

São combinações de fluidos sintéticos e emulsões em água. Estes fluidos são compostos de fluidos sintéticos que contêm somente uma pequena porcentagem de óleo mineral emulsionável, variando de 2 a 30% do total do fluido concentrado, o qual é adicionado a fim de propiciar uma emulsão estável, translúcida e composta de minúsculas gotículas de óleo (Aronson, 1994; ASM, 1991; Bienkowski, 1993; Drozda, 1983).

O restante do concentrado é composto de emulsificadores e água. Aditivos como os umectantes, anti-corrosivos e biocidas também são adicionados. Além disso, quando utilizados em operações mais severas são acrescidos de aditivos EP (extrema pressão) (IOWA, 2003).

Os óleos semi-sintéticos combinam algumas das propriedades dos fluidos sintéticos e dos óleos emulsionáveis. Possuem um melhor controle de oxidação, melhores propriedades refrigerantes, melhores propriedades umectantes, boas propriedades de limpeza e geram menos névoa quando comparadas com as emulsões convencionais (ASM, 1991; IOWA, 2003).

Contudo em determinadas operações oferece um baixo poder de lubrificação, e devido à alta capacidade detergente pode causar dermatites para a pele dos operadores (ASM, 1991; Drozda, 1983).

d) Fluidos sintéticos

Os fluidos sintéticos foram introduzidos na década de 1950, e em sua composição química não contêm óleo mineral. Apresentam geralmente aditivos lubrificantes e inibidores de corrosão dissolvidos em água (Relton, 2007).

Esses fluidos são designados para operações que exigem alta capacidade de refrigeração, proteção contra corrosão e fácil manutenção (Ferraressi, 1977; IOWA, 2003, Relton, 2007). Os fluidos sintéticos possuem as seguintes qualidades:

- Excelente controle microbiológico;
- Resistência a rancidez por longos períodos;
- Não são inflamáveis;
- Não geram fumaça;
- Relativamente não-tóxicos;
- Bom controle da corrosão;
- Boa qualidade de resfriamento;
- Baixa emissão de névoa;

- Baixa geração de espuma;
- Em função da baixa viscosidade, aderem menos nas peças e cavacos, reduzindo o consumo por arraste, diminui assim a necessidade de reposição (IOWA, 1993; Relton, 2007).

As desvantagens apresentadas para este tipo de fluido são:

- Facilmente contaminados por fluidos hidráulicos;
- Monitoramento deve ser eficaz para assegurar a alta eficiência e qualidades funcionais;
- Possuem um alto poder detergente que pode causar dermatites;
- Em condições severas podem gerar espuma e finas névoas;
- Produtos adicionados para aumentar a lubricidade do fluido podem causar emulsificação desses com outros tipos de óleos (IOWA, 1996; Relton, 2007).

A Tabela 2.2 apresenta uma comparação resumida das principais características dos meios lubri-refrigerantes.

Tabela 2.2 - Características dos meios lubri-refrigerantes (Yushiro, 2007; Webster,1995).

	FLUIDOS SINTÉTICOS	FLUIDOS SEMI-SINTÉTICOS	EMULSÕES	ÓLEOS INTEGRAIS
REMOÇÃO DE CALOR	4	3	2	1
LUBRIFICAÇÃO	1	2	3	4
MANUTENÇÃO	3	2	1	4
FACILIDADE DE FILTRAÇÃO	4	3	2	1
ASPECTOS AMBIENTAIS	4	3	2	1
CUSTO/BENEFÍCIO	4	3	2	1
AUMENTO VIDA UTIL FERRAMENTA	1	2	3	4

(1-pior; 4-melhor)

2.8.4 Função de um meio lubri-refrigerante no processo de furação

O processo de furação é considerado uma das operações mais difíceis em função da necessidade de velocidade de corte baixa. Portanto frequentemente necessita da lubrificação proporcionada por aditivos EP e de uma adequada viscosidade para o processo, pois os mesmos agem sinergicamente com a viscosidade do óleo.

Para que a operação seja eficiente é necessário que o meio lubri-refrigerante seja levado até o ponto entre a ferramenta e a peça processada. Se o fluido de corte possuir uma

viscosidade alta haverá uma dificuldade de penetração, conseqüentemente o desempenho da ferramenta será comprometida em função do aumento do atrito, este poderá gerar um calor excessivo e possivelmente “queima” e/ou “destemperamento” da ferramenta, além de problemas na peça processada. No entanto se a viscosidade for baixa, o filme formado entre a peça e a ferramenta não será suficiente para separar a peça e ferramenta, o que provocará um aumento do atrito ocasionando os mesmos problemas conforme descritos acima (Yushiro, 2007).

2.8.5 Aditivos anti-desgaste ou EP em meios lubri-refrigerantes

A ação dos aditivos EP ocorre através de reações químicas que reagem em altas temperaturas (200 a 1000°C) na região de corte, entre o substrato metálico e os elementos químicos, formando sais como fosfeto de ferro, cloreto de ferro, sulfeto de ferro etc. Estes sais constituem uma película anti-solda na face da ferramenta minimizando assim a formação do gume postiço (Stemmer, 2001). O ponto de fusão desses materiais coincide com as faixas de temperaturas existentes na região de corte (Runge & Duarte). Reagem triboquimicamente com o metal exposto durante o processo mecânico, desenvolvem uma boa aderência e formam uma camada protetora entre a peça e a ferramenta de corte (Heinicke e Henning et al, 1984).

2.8.6 Seleção do meio lubri-refrigerante

A seleção de um meio lubri-refrigerante deve estar focada no alcance máximo de desempenho e longevidade e não simplesmente no custo do litro do produto. Alto desempenho e longevidade significam exercer adequadamente suas funções, garantindo maior produtividade, menores tempos de parada de máquina, maior vida da ferramenta e quantidade reduzida de descarte. Uma vez alcançados esses objetivos, intrinsecamente são alcançadas vantagens tanto econômicas como ambientais (IOWA, 2003).

Devido às melhorias significantes em sua formulação, hoje um único fluido pode ser adaptado a diferentes materiais e operações de usinagem. A diminuição da variedade de fluidos em uso numa fábrica simplifica os programas de administração de fluidos (IOWA, 2003).

Para seleção de um meio lubri-refrigerante, os seguintes fatores devem ser considerados:

- Custo e expectativa de vida útil do fluido;

- Compatibilidade química do fluido com componentes da máquina, peça de trabalho e ferramenta;
- Parâmetros de corte passíveis de utilização;
- Taxa de alimentação de fluido de corte;
- Facilidade de limpeza do fluido de corte;
- Facilidade de monitoramento e manutenção do fluido;
- Facilidade de limpeza da máquina-ferramenta e peça de trabalho
- Faixa de temperaturas geradas pela operação;
- Concentração ótima e faixa de variação do pH;
- Práticas de armazenamento;
- Facilidade de reciclagem e descarte (IOWA, 2003; Relton, 2007).

2.8.7 Manutenção e monitoramento dos meios lubri-refrigerantes

Para um bem sucedido de programa de gerenciamento do meio lubri-refrigerante, o monitoramento e a manutenção são elementos cruciais à qualidade dos meios lubri-refrigerantes. Eles devem ser monitorados para prevenir problemas. Aspectos relevantes do monitoramento dos fluidos incluem inspeções de sistema e medições periódicas dos parâmetros dos meios lubri-refrigerantes como a concentração, o controle biológico e o pH. Alterações da qualidade dos fluidos devem ser corrigidas apropriadamente como, por exemplo, através dos ajustes na concentração do meio lubri-refrigerante, da adição de biocidas, óleos sobrenadantes e removedor de partícula metálicas, além do controle do pH. É importante ainda detectar quais alterações sobressair-se-ão em seu sistema e por qual motivo elas ocorrem. Isso permite que o gerenciamento pessoal do meio lubri-refrigerante siga os estágios adequados, os quais são imprescindíveis ao imediato retorno da qualidade do fluido e à prevenção de problemas recorrentes da qualidade (IOWA, 2003).

a) Qualidade da água

A qualidade da água é um aspecto muito importante a ser considerado na preparação dos fluidos miscíveis em água. Indicadores como a dureza e a quantidade de sólidos dissolvidos devem ser monitoradas para conseguir um melhor desempenho e alcançar a vida útil do fluido (IOWA, 1996).

- Dureza

A dureza total da água se dá em função da presença de cátions de cálcio, magnésio e ferrosos. Os mesmos podem reagir com os sabões, agentes umectantes e emulgadores para formar compostos insolúveis; reduzir a reserva de inibidores de corrosão e biocidas; obstruir tubulações e formar depósitos pegajosos na máquina-ferramenta.

Um teor elevado de cátions (acima de 200 ppm) na água será prejudicial às emulsões. Íons negativos excessivos, sulfato, cloreto, carbonato e bicarbonato podem influir negativamente sobre a estabilidade das emulsões, diminuir a vida útil das mesmas, causar problemas com a pele, promover “pitting”, formar manchas e até mesmo comprometer o desempenho das peças processadas (Runge e Duarte, 1989).

- Sólidos dissolvidos

Não somente a dureza é um bom parâmetro para avaliar a qualidade da água. A concentração total de sólidos dissolvidos da água também é um fator importante para monitorar o crescimento de bactérias que tornam o fluido rançoso (IOWA, 2003).

Durante a reposição em função das perdas por evaporação, o processo deve ser realizado com fluidos pré-formulados ao sistema e não apenas água. Água desmineralizada ou deionizada deve ser utilizada para impedir o crescimento de sólidos dissolvidos no fluido (Lukas, 1994).

b) Concentração dos meios lubri-refrigerantes

A manutenção da concentração adequada é primordial para assegurar a qualidade do produto, aumentar a vida útil da ferramenta e controlar as taxas de desenvolvimento das bactérias. No entanto, a alta concentração aumenta os gastos com desperdícios, reduz a dissipação de calor e lubrificação, incidência de gume postiço, contribui com a formação de espuma e resíduos, pode manchar as peças ou a máquina-ferramenta, e por serem mais tóxicos oferecem maior risco a saúde do operador. Já a baixa concentração pode reduzir a lubrificidade, aumentar a atividade biológica e favorecer a oxidação das peças.

Perdas do concentrado e da água ocorrem em função dos espirros e formação de névoa. Por estes fatores, a concentração do meio lubri-refrigerante deve ser monitorada regularmente através de refratômetros conforme ilustrado abaixo pela Figura 2.22 (Gomes, 2005).



Figura 2.22 – Refratômetro utilizado para manutenção da concentração do fluido (Gomes, 2005).

c) Avaliação do pH nos meios lubri-refrigerantes

O valor do pH é a maneira de medir a acidez ou alcalinidade de uma solução aquosa. O pH da água utilizada deve ser de aproximadamente 7 pH, já a emulsão recém-preparada deverá estar entre 8,8 e 9,5 (alcalino). O pH de uma emulsão em uso deverá diminuir nas primeiras horas ou até mesmo em alguns dias, pela absorção do dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera, formando ácido carbônico neste processo. No entanto, não se deve permitir que o pH atinja faixa menor que 8,8, o que pode causar rápida deterioração e/ou quebra da emulsão e conseqüentemente proliferação de bactérias. O decréscimo do pH ainda pode ocorrer em função: óleo de lubrificação geral ou do sistema hidráulico arrastado para a emulsão, resíduo sobre a superfície das peças contaminadas por outras operações, materiais estranhos eventualmente introduzidos e formação de fungos e bactérias. (Runge e Duarte, 1989; Yushiro, 2007)

A Figura 2.23 mostra as relações entre o pH e os fluidos de corte solúveis.

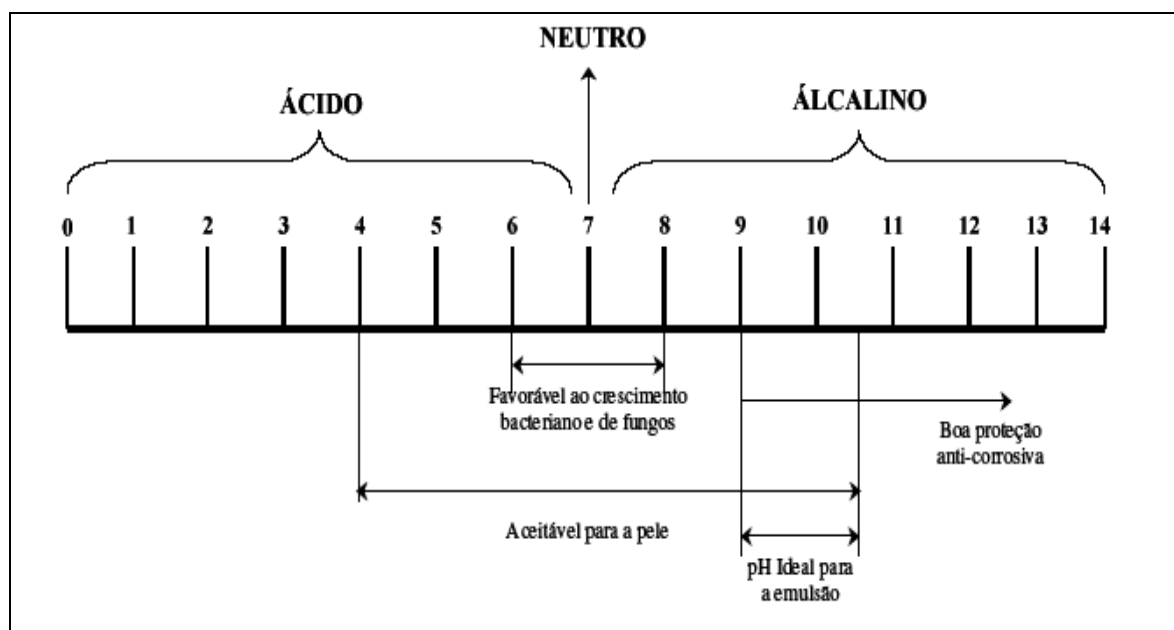


Figura 2.23 - A influência do pH sobre a seleção adequada de fluidos de corte emulsionáveis (Runge e Duarte, 1989; Yushiro, 2007).

d) Viscosidade

A viscosidade deve ser baixa o suficiente para garantir a fácil circulação pela máquina, mantendo um jato de fluxo abundante na área de corte e facilitar a decantação dos cavacos e outros resíduos. Portanto, deve ser suficientemente elevada em alguns casos em que seja maior o grau de lubrificação (Runge e Duarte, 1989).

2.8.8 Reciclagem e descarte dos meios lubri-refrigerantes

Todo fluido de corte solúvel em água deve ser tratado antes de ser jogado nos rios, córregos ou até mesmo sistema municipal de esgotos. Os produtos químicos considerados como poluentes da água são óleos, nitritos, fenóis, fosfatos e metais pesados. Contudo, o conteúdo do óleo pode ser separado da emulsão através de um tratamento de ácido ou sulfato de alumínio (Catai e Bianchi, 2007).

Segundo Silliman (1992) a reciclagem é melhor do que o descarte. A Figura 2.24 ilustra uma maneira de se realizar a disposição do fluido de corte para ser reciclado. Neste processo, os resíduos são separados pelo processo de reciclagem. O fluido limpo é então adicionado ao reciclado e a nova mistura retorna para o equipamento. Este processo elimina a frequência de descarte do fluido de corte, conseqüentemente trazendo benefícios econômicos para a empresa e principalmente beneficiando o meio ambiente (Catai e Bianchi, 2007).

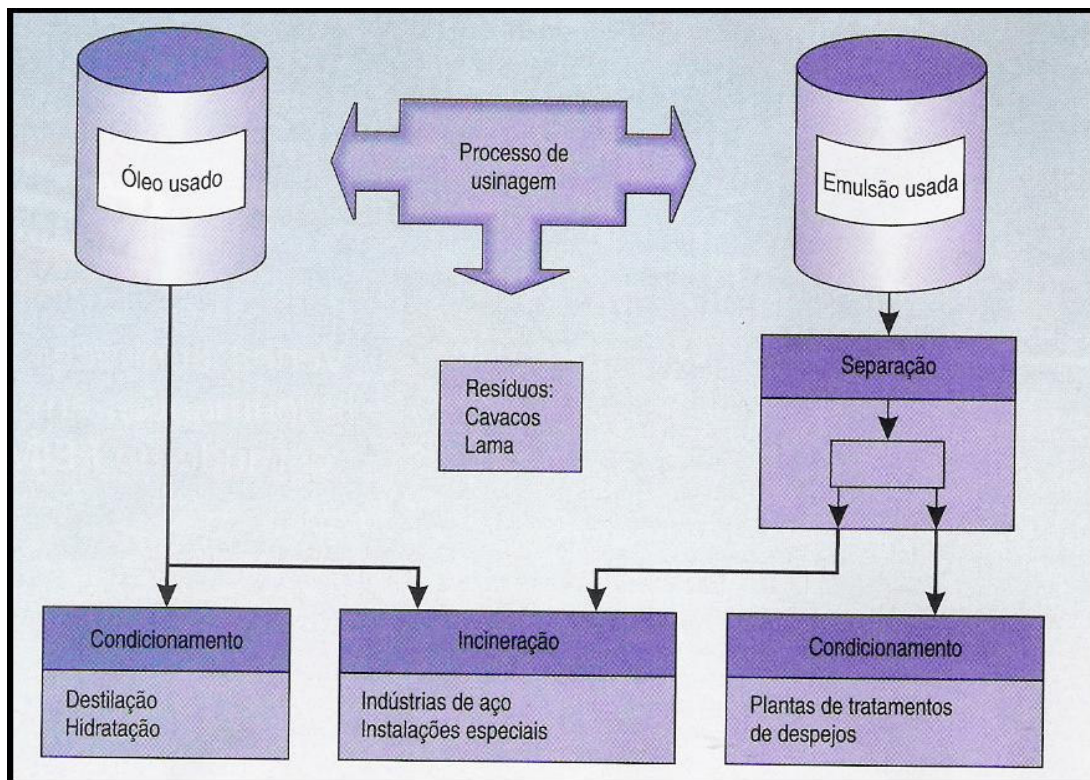


Figura 2.24 – Disposição de fluidos de corte para reciclagem (Catai e Bianchi, 2007).

2.8.9 Sustentabilidade do uso dos produtos químicos

A sustentabilidade do uso de produtos químicos (e matérias-primas em geral) pode ser dividida em dois aspectos: o primeiro aspecto considera a origem das fontes. O óleo mineral é uma matéria-prima fóssil, sua formação ocorreu há milhares de anos atrás por florestas velhas que, sob condições de alta pressão e temperaturas elevadas às biomassas, foram transformadas em betumes e óleos minerais. Por ser uma fonte finita, a viabilidade do óleo mineral é altamente dependente de considerações políticas. Ésteres sintéticos, por outro lado, são derivados de gorduras animais e óleos de plantas como matéria-prima, e são consideradas matérias-primas renováveis. O segundo aspecto considera a poluição do meio ambiente associado com o uso e descarga dos produtos químicos. Este aspecto pode ser dividido em dois sub-aspectos: poluição direta e poluição indireta. A Figura 2.25 mostra o ciclo de vida dos óleos sintéticos (Willing, 2001; apud Alves, 2005).

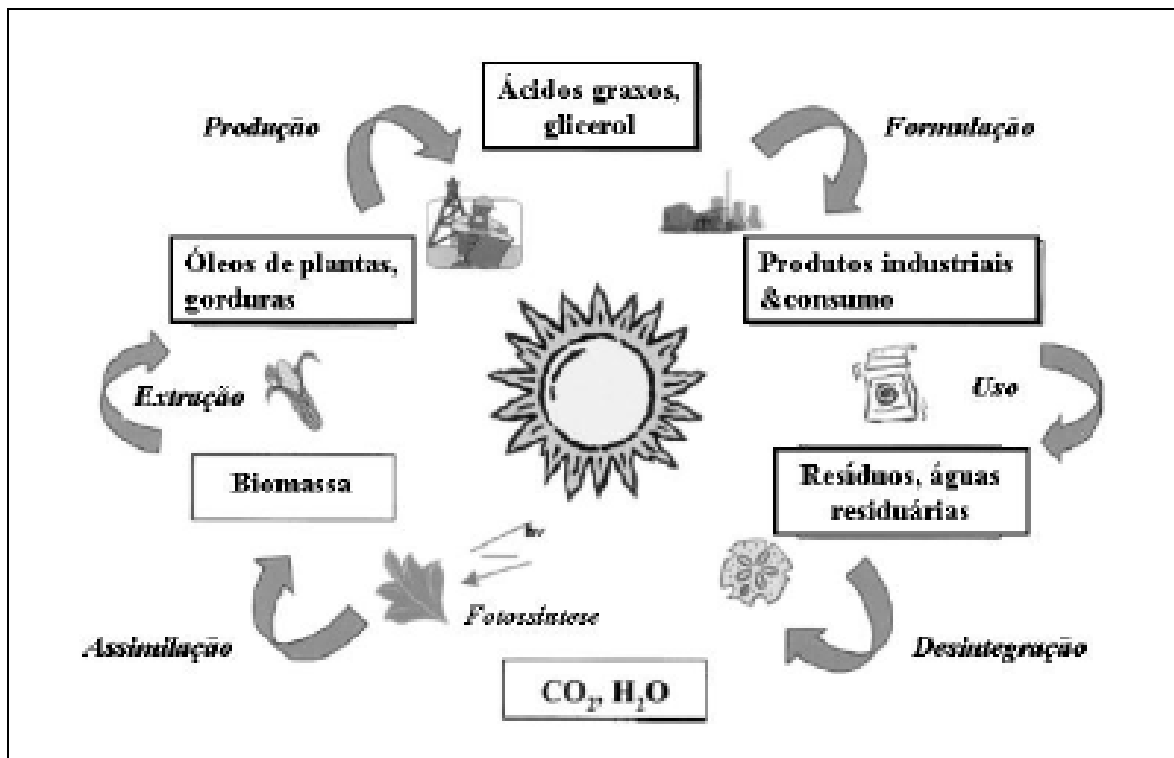


Figura 2.25 - Ciclo de vida dos produtos químicos baseados em fonte renováveis (Alves, 2005).

Na primeira reação catalisada enzimaticamente, o carbono orgânico dos óleos é sintetizado nas folhas das plantas verdes via assimilação fotossintética do gás carbônico da atmosfera. Um excesso de moléculas orgânicas ricas em energia é estocado nas plantas como carboidratos ou como gorduras. Gorduras são ésteres de ácidos graxos com álcool glicerol trifuncional. A biomassa da planta então pode ser usada diretamente para a extração de trigliceróis ou, por exemplo, no caso de biomassa rica em carboidratos, pode ser usada como ração para gados. Os trigliceróis extraídos são sujeitos a reações de quebra de gordura, onde as ligações do éster são hidroliticamente quebradas. Produtos da reação são livres de ácidos graxos e álcool glicerol. Ambos podem ser usados como tais ou podem ser também processados por meios de métodos químicos. Os ácidos graxos, por exemplo, são utilizados para produção de substância de ativos de superfícies. Os óleos químicos resultantes são usados como matéria-prima na formulação de produtos industriais (tecnicamente) ou de produtos de consumo.

Depois do seu uso, os produtos são descartados, onde a maioria será via águas residuárias. Uma pequena fração vai para tanques de armazenamentos finais e ainda uma pequena fração do resíduo é energeticamente usada (queimada). No caso dos óleos químicos, o dióxido de carbono liberado é igual à quantidade de dióxido de carbono que foi originalmente absorvido pelas plantas da atmosfera. Portanto, o balanço do dióxido de carbono da atmosfera

para óleos químicos e especialmente ésteres sintéticos tem efeito nulo. Ao contrário dos óleos químicos, o ciclo de carbono dos produtos petroquímicos não é fechado, mais sim aberto, os óleos de base mineral levam a um aumento do dióxido de carbono atmosférico contribuindo para o aquecimento global. Assim sendo, é altamente viável que um lubrificante ambientalmente compatível ao meio ambiente seja usado sempre que possível (Willing, 2001; apud Alves, 2005).

2.8.10 Política ambiental para meios lubri-refrigerantes

A política ambiental deve seguir leis nacionais, leis internacionais ou até mesmo leis estaduais, dependendo da situação. Em âmbito federal, o órgão responsável pela fiscalização das leis ambientais brasileiras para o uso e descarte de fluidos de corte é o Conama. Conforme a Resolução 362/05 do Conama considera crime ambiental não somente descartar o óleo no meio ambiente como também comercializar, fornecer, transportar ou dar outro destino ao não ser por reciclagem através do rerrefino. Segundo Monici (1999), tanto como os órgãos de proteção ao meio ambiente internacional como os nacionais estão cada vez mais exigindo das empresas o correto descarte e rejeitos industriais. Um recurso que pode fortalecer as empresas em relação aos fatores ecológicos ambientalmente corretos é a obtenção da certificação ISO 14000, que torna a empresa oficialmente comprometida com o meio ambiente (Catai e Bianchi, 2007).

2.8.11 Atuais tendências para utilização dos meios lubri-refrigerantes

Em função de questões econômicas, ambientais e trabalhistas, há uma tendência por alternativas que possam substituir o uso dos fluidos de corte na usinagem dos metais (Klocle, 1997). No Brasil, os riscos associados à utilização dos fluidos de corte não são abordados por uma legislação própria, que exija o controle dos riscos no local de trabalho e no meio ambiente (Bartz, 2001).

Nos Estados Unidos e principalmente na Europa, após regulamentações e leis decretadas, a formulação dos fluidos de corte foi afetada significativamente. A indústria que utiliza tais fluidos está procurando continuamente melhorar o seu desempenho através de uma variada quantidade de aditivos adicionada às formulações dos fluidos de corte. Por outro lado, uniões das indústrias e governo reforçam as tendências para um ambiente de trabalho

saudável e seguro, bem como aspectos de disposição influenciando o meio ambiente (Bartz, 2001).

Estas tendências têm afetado a formulação dos fluidos de corte na Europa e Estados Unidos no sentido da remoção de nitritos, substituindo quantidade de lubrificantes, usinagem a seco, utilização de fluidos ambientalmente favoráveis (ar, fluido polimérico, fluido biodegradável), entre outros. Todas estas remoções e substituições têm sido realizadas com o cuidado de não afetar adversamente o desempenho dos fluidos de corte (Bartz, 2001).

Devido à necessidade de conformidade com a norma ISO 14000, existe grande preocupação com a tecnologia de refrigeração/lubrificação que diminua o impacto ambiental dos fluidos de corte e preservar os recursos energéticos (Klocke, F und Gerschwiler, K., 1996).

Algumas alternativas têm sido estudadas para substituir os métodos tradicionais de refrigeração, tais como mínima quantidade de corte. Porém, para os processos fechados, como a furação, tornar-se-ão críticos devido à dificuldade de remoção dos cavacos (Queiroz, Boehs e Sant'anna, 1999).

a) Usinagem a seco

A usinagem a seco é a melhor alternativa para resolver os problemas causados pelos fluidos de corte, mas não consiste simplesmente interromper a alimentação de fluido de corte e constituir a usinagem a seco no processo. No entanto, exige uma adaptação compatível de todos os fatores influentes neste processo, conforme ilustrado na Figura 2.26.

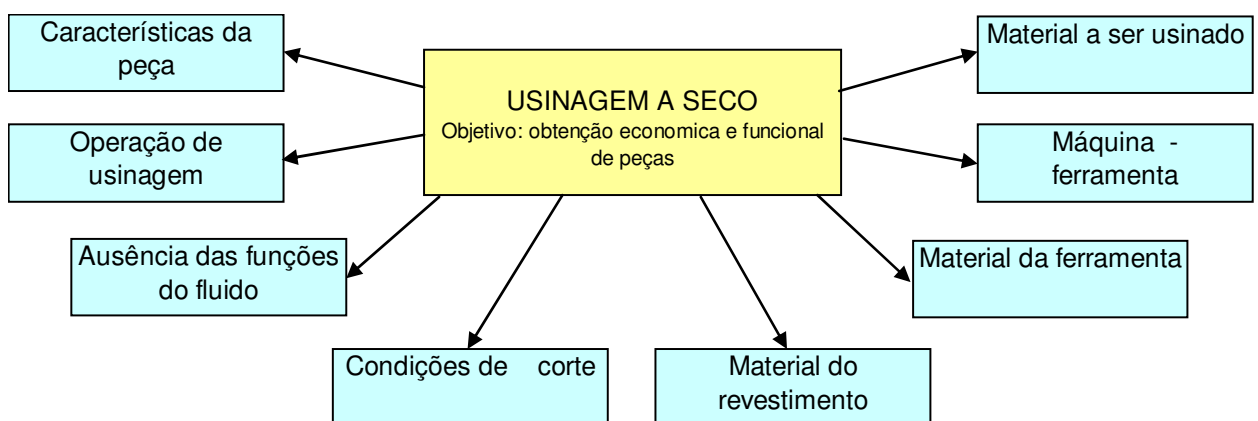


Figura 2.26 – Fatores influentes na usinagem a seco (Schroeter e Weingaertner, 2002).

Assim sendo, as funções primárias dos fluidos de corte, ou seja, refrigeração, lubrificação e transporte de cavacos não se incluem na usinagem a seco. Portanto, a necessidade de medidas adequadas para compensar estas funções primárias dos fluidos de

corte é crucial para que a adaptação da usinagem a seco seja concretizada (Schroeter e Weingaertner, 2002).

b) Mínima quantidade de lubrificante (MQL)

Em alguns casos se torna necessário a manutenção do fluido de corte em função da dificuldade da implantação da usinagem a seco, porém os volumes podem ser reduzidos consideravelmente se comparados aos volumes tradicionais. Portanto, uma redução drástica nos volumes empregados de fluidos de corte nas operações de usinagem contribui expressivamente para o meio ambiente. O sucesso técnico e econômico de cada operação irá exigir uma adaptação nas características técnicas dos fluidos de corte a esta nova condição de trabalho. Os critérios usualmente aceitos para esta aplicação são:

- Quantidade reduzida de fluido de corte (QRFC)

É o termo utilizado quando a vazão de fluido de corte empregado na operação for menor que 2 l/min para processos com geometria definida, e menor que 1 l/min por milímetro de largura de rebolo, para retificação (Schroeter e Weingaertner, 2002).

- Quantidade mínima de fluido de corte (QMFC ou MQL)

É empregada para sistemas de névoa, onde o consumo na operação fique abaixo de 50ml/h de fluido de corte (Schroeter e Weingaertner, 2002). A função de lubrificação é assegurada pelo óleo e de refrigeração, mesmo que pequena, pelo ar comprimido. Essa pequena quantidade de fluido é suficiente para reduzir o atrito no corte, diminuindo a tendência à aderência em materiais com tais características (Bezerra et al, 2004).

c) Fluidos de corte biodegradáveis e bioestáveis

A solução ou a emulsão deve durar o maior tempo possível. No entanto, um fluido de corte solúvel tem que ser bioestável e compatível com o meio ambiente e não biodegradável. É fundamental que a água resultante do descarte da emulsão não contenha produtos agressivos à fauna e a flora aquática, portanto é necessário que a formulação do fluido de corte contenha componentes que facilitem e reduzam o custo do descarte. Nitritos e fenóis, usados amplamente na formulação de fluidos de corte solúveis tradicionais, passam para uma fase aquosa do fluido, e por ocasião do descarte, encontram-se na água resultante da quebra das emulsões. Deseja-se a presença apenas em quantidades mínimas ou preferencialmente a sua ausência.

Fluidos de corte solúveis com composições químicas mais resistentes ao ataque de microrganismos também resolvem esta questão, pois neste caso os biocidas não são

necessários, ou o sejam em quantidades mínimas. Portanto a quantidade a ser descartada de fluido de corte será mínima (Runge e Duarte, 1989).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais, as ferramentas, os equipamentos e os métodos utilizados na realização deste trabalho. Os ensaios de furação e medição de desgaste com refrigeração externa foram realizados na Sociedade Educacional de Santa Catarina (SOCIESC). As análises de microscopia eletrônica por varredura (MEV) foram feitas na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). As avaliações metalúrgicas e as análises de qualidade dos furos foram realizadas na Tupy S.A.

3.1 Corpos-de-prova

Os corpos-de-prova utilizados na pesquisa foram de ferro fundido vermicular, com composição, características e propriedades descritas nos itens a seguir. Os corpos-de-prova foram produzidos respeitando-se as propriedades mecânicas e microestruturais conforme a matéria-prima utilizada na indústria automobilística para fabricação de blocos de motores.

A Tabela 3.1 mostra as suas dimensões, e a Figura 3.1 ilustra a geometria dos corpos de prova empregados nos experimentos.

Tabela 3.1 – Dimensões do corpo-de-prova utilizado no experimento

Descrição	Altura	Largura	Comprimento	Distância entre centros	Diâmetro do furo	Profundidade do furo
Dimensões (mm)	40	250	400	12	10	30

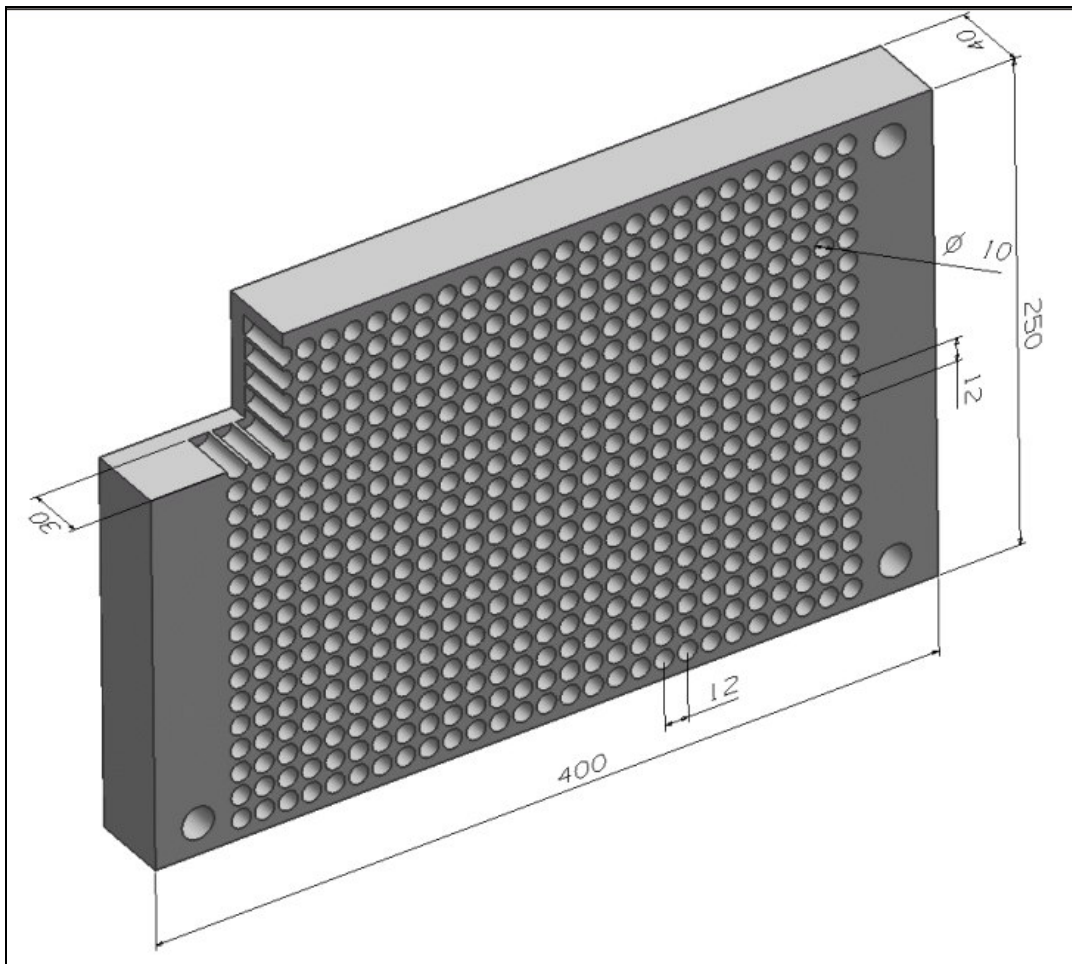


Figura 3.1 – Corpo de prova de ferro fundido vermicular utilizado no experimento

Através do faceamento foi retirado 2 mm de sobremetal para eliminar a zona coquilhada dos corpos-de-prova. Esta camada por sua vez é a que apresenta maior dureza, podendo afetar significativamente a vida da ferramenta de corte (Andrade, 2005).

3.1.1 Análises mecânicas e composição química

A composição química do material empregado nos ensaios é apresentada nas Tabelas 3.2 e 3.3, sendo os resultados obtidos através de espectrômetro e via Quimitron.

Tabela 3.2 – Composição química das placas de ferro fundido vermicular utilizadas na pesquisa.

Elemento(%)	Si	Mn	P	Sn	Cr	Mg	Cu	Ti	Ni
Placa 1	2,30	0,34	0,038	0,041	0,044	0,004	0,82	0,021	0,021
Placa 2	2,37	0,31	0,026	0,036	0,038	0,003	0,87	0,017	0,022
Placa 3	2,36	0,31	0,029	0,036	0,038	0,005	0,87	0,016	0,021

Tabela 3.3 – Composição química das placas de ferro fundido vermicular utilizadas na pesquisa.

Elemento(%)	C	S
Placa 1	3,64	0,011
Placa 2	3,53	0,012
Placa 3	3,56	0,010

3.1.2 Análise microestrutural

Todos os corpos-de-prova usinados tiveram retiradas amostras semicirculares para efetuar análises microestruturais na sua secção transversal. Através de fotos das amostras polidas foram avaliados os tipos de grafita, a percentagem de grafita nodular e vermicular. A mesma amostra foi posteriormente submetida a um ataque com nital 2% e utilizada na quantificação das percentagens de perlita e grafita.

Para as análises foi utilizado um microscópio óptico com aumento máximo de 1.000x, modelo Optiphot, marca Nikon, conforme Figura 3.2.



Figura 3.2 – Microscópio utilizado para avaliação dos corpos-de-prova

As imagens produzidas foram tratadas com o software Image-pro Plus versão 5.1, produzido pela Empresa Media Cybernetics. Os resultados das análises de imagens são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Porcentagem de perlita, forma da grafita e nodularização na estrutura das placas utilizadas nos ensaios.

Amostras	Matriz	Grafita		
		Forma	Nodular (%)	Área (%)
1	Perlítica com ~5,0% de Ferrita	III e VI	3	10
2	Perlítica com ~4,0% de Ferrita	III e VI	2	11
3	Perlítica com ~6,0% de Ferrita	III e VI	3	11

Obs.: Grafita III indica que a liga é de predominância vermicular. Apresentam-se normalmente acima de 80% na liga.

Grafita VI significa o grau de nodularização composto na liga. Para as peças da Tupy S.A. admitisse até 20% nodular, que tem como objetivo melhorar a resistência mecânica das mesmas.

A forma das Grafitas encontram-se no **Anexo 1**.

Nas Figuras 3.3 e 3.4 são mostradas algumas micrografias de ferro fundido vermicular sem e com ataque de nital 3% dos corpos-de-prova usinados, obtidas através do microscópio óptico, com aumento de 100x. Algumas das imagens aqui apresentadas podem divergir aparentemente das análises quantitativas, sendo que os valores das quantidades contidas representam a média de várias regiões da amostra do material.

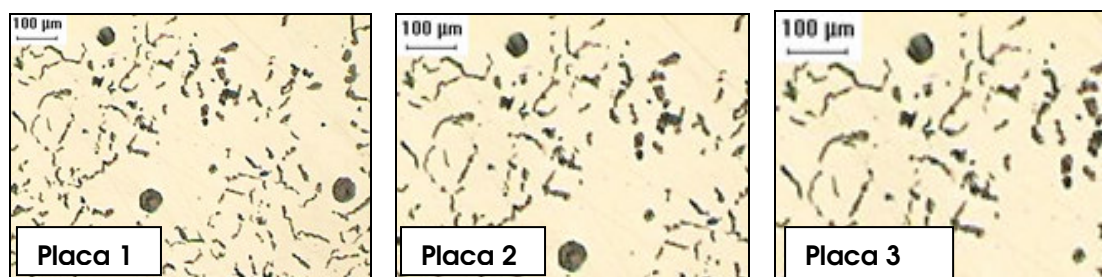


Figura 3.3 – Micrografias representativas de uma região do núcleo das amostras 1, 2 e 3 dos corpos-de-prova (sem ataque, aumento 100x) utilizados na pesquisa, onde se observam as grafitas de vermicular e nodular e a matriz metálica.

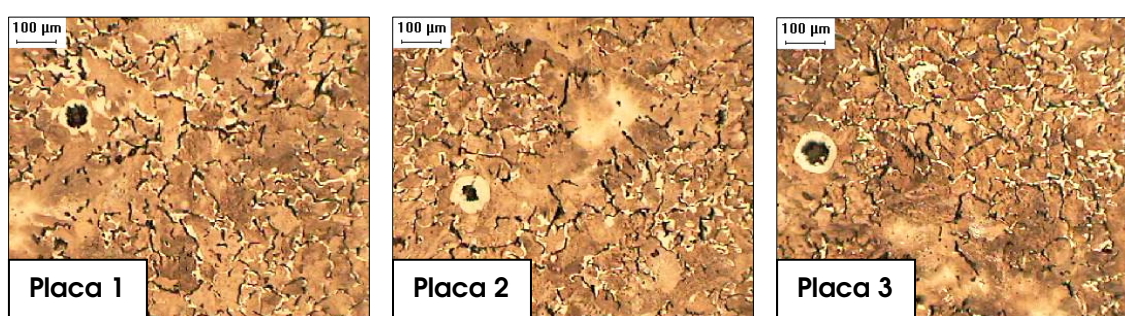


Figura 3.4 – Micrografias representativas de uma região do núcleo das amostras 1, 2 e 3 dos corpos de prova (com ataque nital 3%, aumento 100x) utilizados na pesquisa, onde se observam as grafitas de ferro fundido vermicular e nodular e a matriz perlítica com pouca ferrita.

De acordo com Dawson *et al.* (1999) e Mocellin (2004) a caracterização da perlita é muito importante, por estar diretamente ligada à quantidade de cementita (Fe_3C) na estrutura do material, influenciando significativamente na sua usinabilidade. As variações nos tempos de desmoldagem das peças e alterações nos teores de elementos perlitizantes podem gerar perlitas com características diferentes entre si.

Perlitas com maiores quantidades de cementita, onde as lamelas são mais unidas e espessas, também podem dificultar o processo de usinagem do ferro fundido vermicular (Dawson *et al.*, 2001).

3.1.3 Determinação da dureza

O equipamento utilizado para determinação da dureza dos corpos-de-prova foi o durômetro Wolpert, modelo BK 300A, que possui um penetrador de esfera de tungstênio de

10 mm e tem capacidade de carga de 3000 kgf. Os materiais foram caracterizados através de ensaio de dureza Brinell.

A Figura 3.5 ilustra o modelo de corpo-de-prova utilizado para avaliação de dureza referente às três placas utilizadas no experimento: Placa 1, Placa 2 e Placa 3. As identificações A1, B1, C1, A2, B2, C2, A3, B3, C3 correspondem às regiões utilizadas para a medição da dureza, sendo que, para cada ferramenta foram utilizados dois corpos de prova, um no início de vida e outro no final de vida da ferramenta.

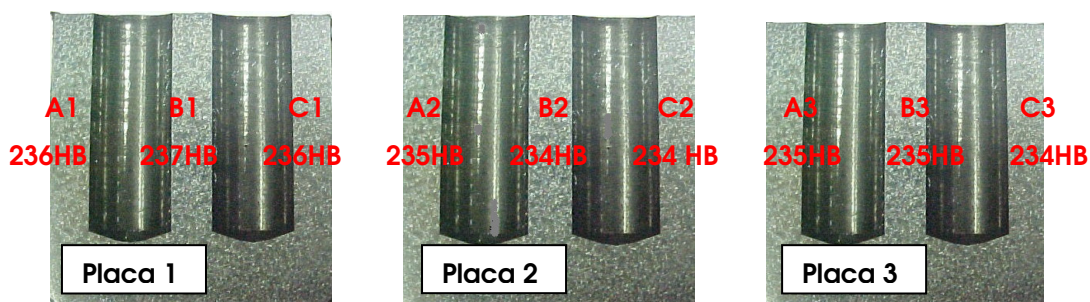


Figura 3.5 – Amostras de ferro fundido vermicular utilizadas para análise metalográfica e medição de dureza.

Na Tabela 3.5 são mostrados os resultados da dureza média obtida de cada placa e o desvio-padrão entre elas.

Tabela 3.5 - Dureza Brinell média e o desvio-padrão dos corpos-de-prova de ferro fundido vermicular

Descrição	Placa 1	Placa 2	Placa 3
Dureza Média (HB)	236	234	236
Desvio Padrão	3	3	3

3.1.4 Determinação das Propriedades Mecânicas

Os ensaios foram realizados conforme norma ABNT NBR6152, num total de três ensaios para cada placa utilizada no experimento. A Figura 3.6 demonstra o tipo do corpo de prova utilizado para o ensaio de tração e os resultados são apresentados na Tabela 3.6. Para concretização deste ensaio, usou-se uma máquina de tração universal marca Kratos.

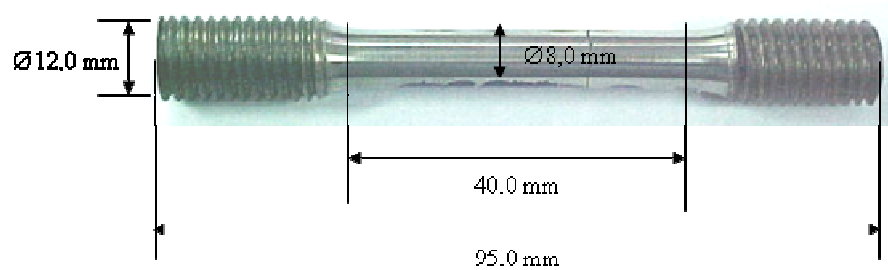


Figura 3.6 – Corpo de prova de ferro fundido vermicular utilizado para o ensaio de tração

Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas do material utilizado no experimento

Placa	Tração		
	LR (Mpa)	LE (MPa)	A (%)
1	446	326	1,78
2	413	338	1,6
3	428	338	2,5

3.2 Máquina- ferramenta utilizada

Os ensaios de furação foram realizados em um centro de usinagem Feeler, modelo FV-600, série VE 252, que possui uma árvore vertical com rotação máxima de 6000 rpm, potência disponível de 10 HP e comando Mitsubishi Meldas M3 (Figura 3.7). Este equipamento possui um reservatório para o meio lubrificante com capacidade de 100 litros com uma bomba, mangueiras, válvulas e manômetro, e está localizado na Sociedade Educacional de Santa Catarina (SOCIESC).



Figura 3.7 - Centro de usinagem Feeler utilizado no experimento

3.3 Identificação e caracterização das brocas

Neste trabalho foram utilizadas brocas helicoidais de diâmetro de 10 mm com canal de refrigeração, produzidas pelo fabricante Titex (Figura 3.8).



Figura 3.8 – Broca helicoidal usada no experimento

Apesar de possuírem o canal de refrigeração, as mesmas foram utilizadas com refrigeração externa devido à concepção da máquina-ferramenta, que não permite adução de fluido internamente. Contudo, segundo o fabricante das brocas, as mesmas podem ser empregadas também com refrigeração externa.

As principais especificações das ferramentas utilizadas nos experimentos estão descritas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Especificações da broca helicoidal

Ferramenta	Material	Revestimento	Diâmetro	Comprimento
Broca helicoidal	Metal-duro	TiNAl	10 mm	100 mm

Para a execução do experimento foram adquiridas 30 brocas, todas pertencentes a um mesmo lote de produção, com as quais foram usinados todos os corpos-de-prova para minimizar eventuais diferenças de desempenho. A fim de garantir que não houvesse interferência da geometria da broca nos ensaios, foram conferidas as dimensões de todas as ferramentas antes da utilização das mesmas. Os resultados de medição encontram-se no **Anexo 2**.

3.3.1 Critério de fim-de-vida das brocas

Inicialmente foram medidos os desgastes das guias e desgaste de cratera, porém, tais desgastes estabilizaram-se nos primeiros metros da furação durante o experimento. Já o desgaste de flanco (VB_{max}), conforme Figura 3.9, apresentou um desgaste contínuo ao longo da furação. Portanto o fim de vida das brocas foi definido por um desgaste de flanco máximo igual a 0,30 mm, valor este estabelecido definido com base nos pré-ensaios.

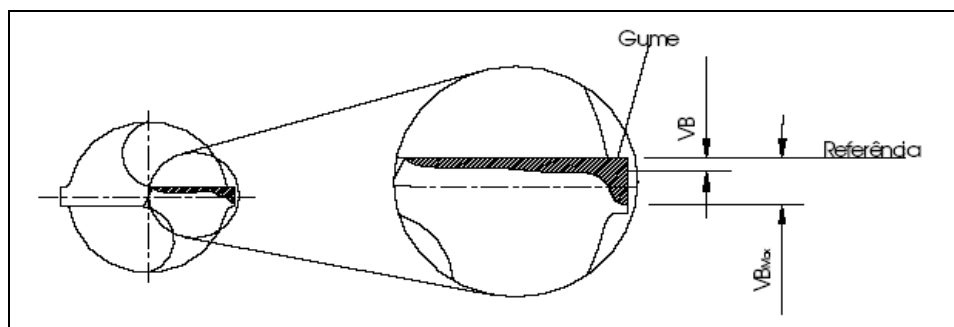


Figura 3.9 – Ilustração dos desgastes VB e VB_{max} de uma broca (Schroeter, 1999)

3.4 Parâmetros de corte

Foi escolhida uma velocidade de corte tal que fosse possível concluir os experimentos, pois como fatores limitantes existiam as quantidades de corpos-de-prova e de ferramentas. Através de pré-ensaios foram determinadas as grandezas de corte necessárias para execução do experimento, conforme apresentado na Tabela 3.8 cv. O detalhamento do pré-ensaios está no capítulo seguinte.

Tabela 3.8 - Parâmetros de corte utilizados no experimento

Descrição	Velocidades
Velocidade de corte (v_c)	109,9 m/min
Velocidade de avanço (v_f)	350 mm/min
Avanço (v_f)	0,1 mm
Rotação	3500 rpm

CAPÍTULO 4

PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO EXPERIMENTAL

4.1 *Pré-ensaios de furação*

Foram realizados pré-testes de furação no ferro fundido vermicular sem meio lubri-refrigerante num total de três ferramentas, visando à seleção de velocidade de corte e avanço adequados para a realização dos demais ensaios. O objetivo dos pré-ensaios foi a otimização da quantidade de corpos-de-prova e de ferramentas. Os parâmetros foram escolhidos visando a alcançar a vida das brocas de 10 metros de furação, dentro de uma faixa de aplicação industrial.

Primeiramente foi avaliada a velocidade de 150 m/min, mas, durante os ensaios observou-se uma vibração muito forte já nos primeiros metros da furação, e também ocorreu o colapso de uma das ferramentas. Portanto foi estabelecido, sob orientação do fabricante da ferramenta e principalmente através da análise dos resultados do pré-ensaio, que os parâmetros seriam alterados para $v_c = 110$ m/min e $f = 0,1$ mm, tornando o processo mais seguro para este experimento.

Uma vez definidos os parâmetros de corte, procurou-se estabelecer os tipos de desgaste predominantes nas brocas para avaliar a vida da ferramenta. Considerando que os desgastes de guia e cratera estabilizaram-se já nos primeiros metros da furação, decidiu-se por avaliar os desgastes de flanco VB e VB_{max} , visto que os mesmos apresentaram uma evolução ao longo dos ensaios.

4.2 *Ensaio de furação*

Os ensaios de furação foram realizados na Sociedade Educacional de Santa Catarina (SOCIESC), onde foi avaliada primeiramente a furação dos corpos-de-prova sem meio lubri-refrigerante. Essa primeira etapa foi definida como padrão de comparação para os demais ensaios com meios lubri-refrigerantes.

O tipo de adução de fluido empregado no experimento foi de forma externa, em função da limitação do equipamento, conforme já apresentado no item 3.3.

Na segunda etapa foi avaliado o desempenho dos meios lubri-refrigerantes com os mesmos critérios utilizados para definição da usinagem a seco, quais sejam:

- 1) Medição de dureza dos corpos-de-prova;
- 2) Remoção de 2 mm do sobremetal dos corpos-de-prova a fim de eliminar a zona coquilhada, sendo esta a camada de maior dureza;
- 3) Medição do desgaste de flanco máximo (VB_{max}) a cada 0,15 metros de furação;
- 4) Troca da ferramenta quando VB_{max} atingia o desgaste de 0,3 mm;
- 5) Avaliação da qualidade dos furos, diâmetro, conicidade e rugosidades R_a e R_z da superfície.

Em função da quantidade reduzida de corpos-de-prova e de ferramentas, utilizaram-se três ferramentas para cada condição diferente de teste, uma usinagem a seco e três usinagens com meios lubri-refrigerantes. Em caso de haver uma condição muito diferente, repetiam-se os ensaios com a ferramenta até atingir no mínimo três resultados aceitáveis para o estudo. Para tanto, no intuito de assegurar que os corpos-de-prova estivessem com as mesmas condições estruturais, avaliava-se uma nova ferramenta sem lubrificação em cada novo corpo-de-prova.

4.3 Fixações da peça e da ferramenta

Para fixação da peça e da ferramenta foram minimizados o batimento da ferramenta e erros de posicionamento da peça, com o intuito de melhorar o desempenho da broca.

4.3.1 Fixação da ferramenta

Para fixação da ferramenta foi utilizado um cone da marca Sanches Blañes fornecido pela Tupy S.A., conforme Figura 4.1.

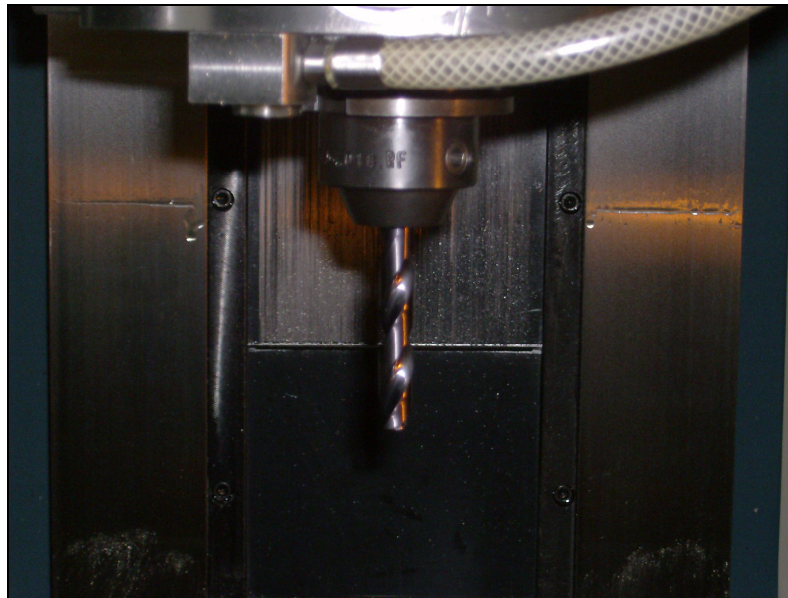


Figura 4.1 – Fixação da ferramenta no cone

4.3.2 Fixação da peça

Para garantir a segurança e a precisão dos ensaios os corpos-de-prova foram fixados em quatro pontos, nas extremidades, por um sistema de parafusos conforme ilustrado pela Figura 4.2.

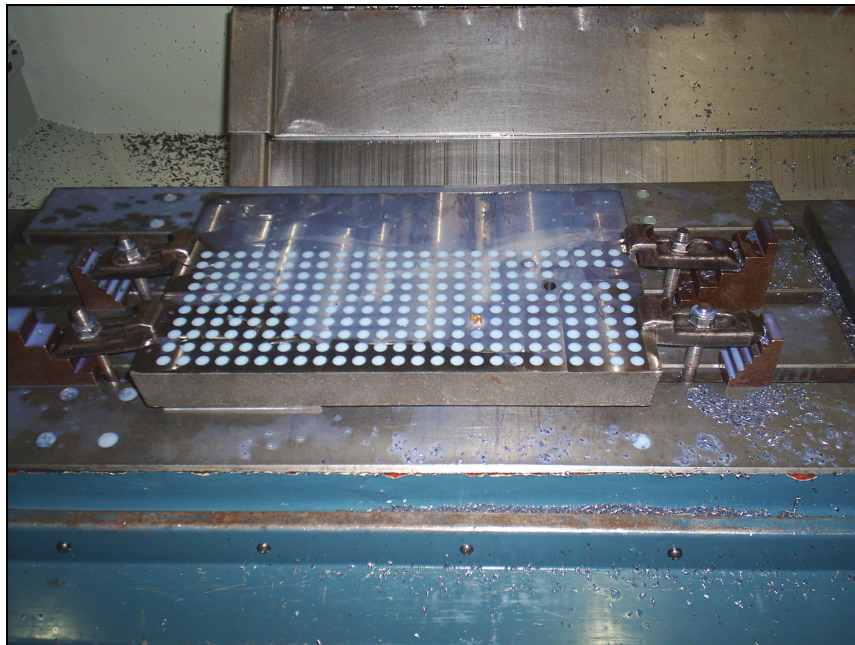


Figura 4.2 – Fixação do corpo-de-prova na máquina

4.4 Medição do desgaste das ferramentas

As medições de desgaste foram realizadas em um microscópio óptico marca Mitutoyo, com aumento de 20 vezes e resolução de 0,01 mm, conforme ilustrado na Figura 4.3.



Figura 4.3 – Microscópio utilizado para avaliação do desgaste das brocas

O parâmetro de desgaste avaliado foi o VB_{max} e VB a cada 0,15 metros de furação. Como ponto de referência foi adotada a linha no topo da ferramenta, de acordo com a Figura 4.4.

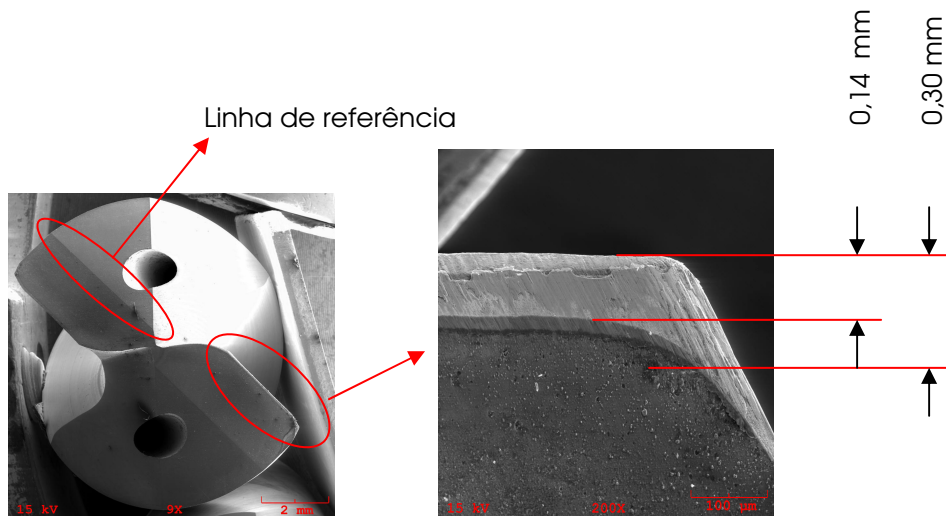


Figura 4.4 – Medição do desgaste da broca durante os ensaios

4.5 Avaliação e qualidade dos furos

A metodologia utilizada na avaliação da qualidade dos furos foi baseada na medição dos corpos-de-prova a cada 0,15 metros de furação, de modo semelhante ao definido para obtenção dos desgastes de flanco VB e $VB_{máx}$. A qualidade dos furos foi avaliada através dos seguintes parâmetros: diâmetro, cilindricidade, circularidade, conicidade e a rugosidade da parede do furo.

a) Diâmetro

Foi utilizado um Micrômetro interno de três pontos, da marca Mitutoyo (Figura 4.5).

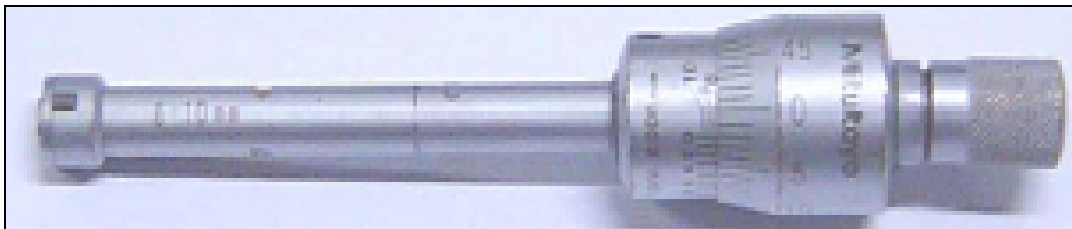


Figura 4.5 – Micrômetro Mitutoyo interno de três pontos

As medições foram realizadas nos três primeiros furos e nos últimos três furos feitos com cada broca, sendo que foram calculadas as médias entre eles.

b) Cilindricidade, Circularidade e Conicidade

Esses dados foram obtidos através da Máquina de Medição Tridimensional Zeiss Prismo Navigator que está localizada na unidade de Usinagem da Tupy S.A., Figura 4.6.



Figura 4.6 – Máquina de Medição Tridimensional Zeiss Prismo Navigator

Para obtenção dos dados foram realizadas medições a 3 mm, 14 mm e 26 mm de profundidade de cada furo.

c) Rugosidade

Para as medições de rugosidade foi utilizado o Rugosímetro Mitutoyo SJ-2001. Os resultados de rugosidade foram obtidos através de medições a 0° e 90° , a 20 mm de profundidade, e para a descrição dos mesmos foram utilizados os padrões R_a e R_z , por serem estes os parâmetros de maior utilização na indústria automobilística.

4.6 Avaliação por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e micro-sonda (EDS).

Para avaliação das brocas por microscopia eletrônica por varredura (MEV) e micro-sonda (EDS) foi utilizado o equipamento da Universidade Estadual de Santa Catarina (UDESC), conforme Figura 4.7.



Figura 4.7 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Todos os corpos-de-prova e todas as brocas utilizadas nos experimentos foram submetidos às avaliações por microscopia eletrônica por varredura, a fim de se avaliar a vida de cada ferramenta sob a aplicação dos três tipos de meio lubri-refrigerante e na condição a seco.

Na Figura 4.8 apresentam-se os dispositivos utilizados para a fixação das seções das brocas e as respectivas regiões para avaliação dos mecanismos de desgaste conforme Figura 4.8: (a) dispositivo para medição do desgaste do ângulo de folga da ferramenta; (b) dispositivo para medição ângulo de saída do cavaco.

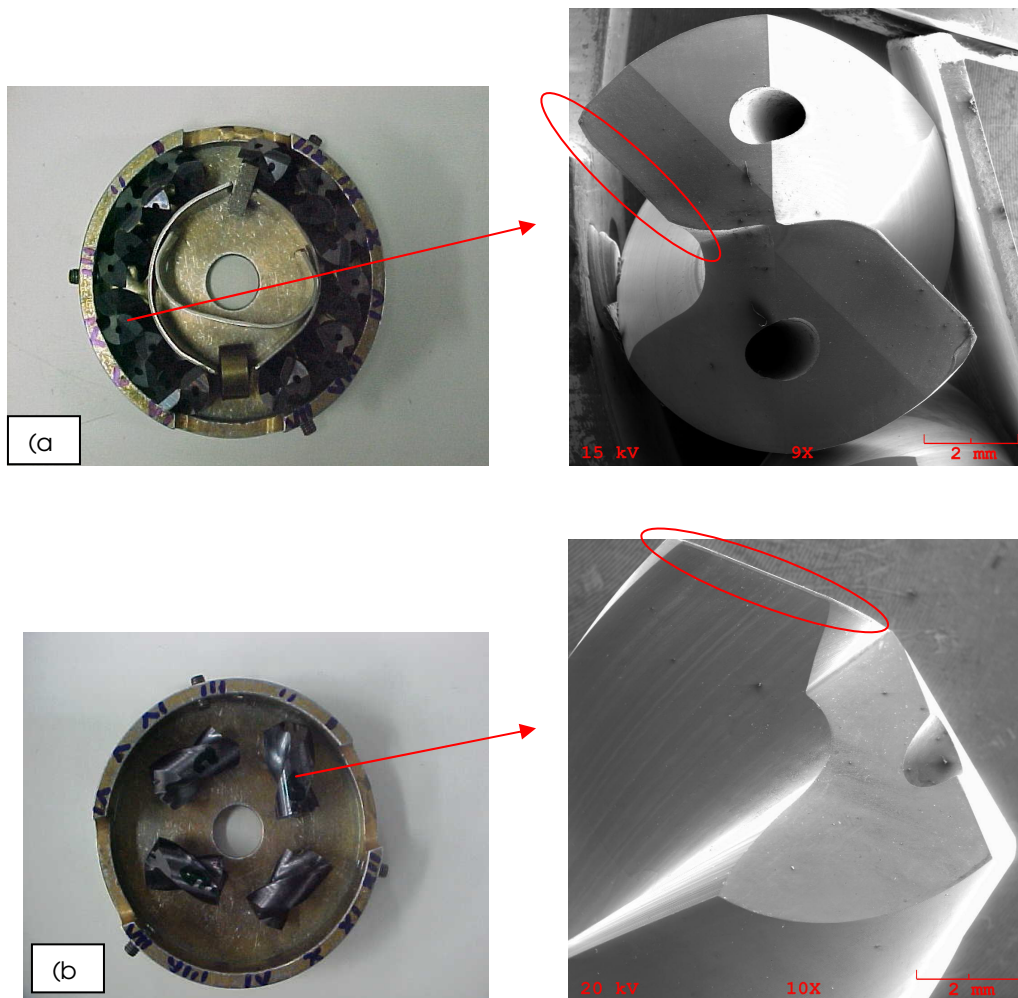


Figura 4.8 - Fixação das ferramentas para avaliação MEV e EDS. (a) Análise do ângulo de folga da ferramenta, (b) Análise do ângulo de saída do cavaco.

4.7 Avaliação dos meios lubri-refrigerantes

As características dos meios lubri-refrigerantes utilizados no experimento são apresentadas na Tabela 4.1. Informações sobre óleos base, aditivos e algumas características químicas são descritas também nesta tabela, sendo que todos os meios lubri-refrigerantes utilizados são semi-sintéticos com formulações diferentes, desenvolvidos para usinagem de ferro fundido vermicular e sugeridos pelo fornecedor dos fluidos.

Tabela 4.1 - Descrição dos fluidos utilizados na furação do ferro fundido vermicular.

Meio Lubri-Refrigerante	Óleo Base	Aditivos	Densidade (g/cm ³)	PH	Concentração
A	Óleo mineral (35%) + éster (10%)	Aditivo EP (10%)	0,978	9,0 a 9,5	8%
B	Óleo mineral (50%)	Aditivo EP (5%)	1,020	9,0	8%
C	Polímero (20%)	Sem aditivo EP	1.011	9.0 a 9.4	8%

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos experimentos sob velocidade de corte $v_c=110$ m/min e avanço $f=0,1$ mm. São avaliadas as vidas das brocas em relação aos meios lubri-refrigerantes utilizados na furação e a qualidade dos furos através dos diâmetros, retitudes, cilindridades, circularidades e rugosidades R_a e R_z . Todas as grandezas foram avaliadas a cada 0,15 metros de furação, conforme descrito no Planejamento e Execução Experimental, Capítulo 4. Também são mostradas as fotos realizadas por microscópio eletrônico de varredura (MEV) de três regiões distintas no ângulo de saída do cavaco e ângulo de folga das brocas. Além disso, foram realizadas as análises por microsonda (EDS) com objetivo de avaliar as possíveis reações entre a peça, ferramenta e os meios lubri-refrigerantes. O critério adotado para fim de vida das ferramentas foi o desgaste de flanco, considerando $VB_{max} = 0,3$ mm (vide capítulo 4).

Para as análises estatísticas foi utilizado o software Minitab para a geração do gráfico Boxplot, que representa simultaneamente várias características de um conjunto de dados: dispersão, simetria ou assimetria da distribuição de pontos e presença de observações discrepantes (Werkema, 1995). No **Anexo 3** está uma breve explanação de interpretação do gráfico. E para avaliação dos resultados obtidos foi utilizada a Análise de Variância, em intervalos de confiança de 95% (Montgomery e Runger, 2003), **Anexo 4**.

5.2 Ensaio de vida

A Figura 5.1 apresenta as curvas de vida da broca para usinagem com três tipos de meios lubri-refrigerantes, definidos como A, B e C, e usinagem a seco. As mesmas descrevem o comportamento do desgaste para a velocidade de corte de 110 m/min.

Através da análise das curvas de desgaste, concluiu-se que até 0,45 metros de usinagem as quatro condições apresentaram tendências semelhantes, mas a partir deste comprimento de usinagem as condições de usinagem a seco e com o meio lubri-refrigerante C

apresentaram um desgaste mais acentuado, em comparação às demais condições. O meio lubri-refrigerante B, por sua vez, permitiu um melhor desempenho em relação às duas condições citadas anteriormente. Para o meio lubri-refrigerante A, verificou-se o menor desgaste em todas as condições para este experimento até o final de vida da ferramenta, considerando VB_{\max} de 0,30 mm.

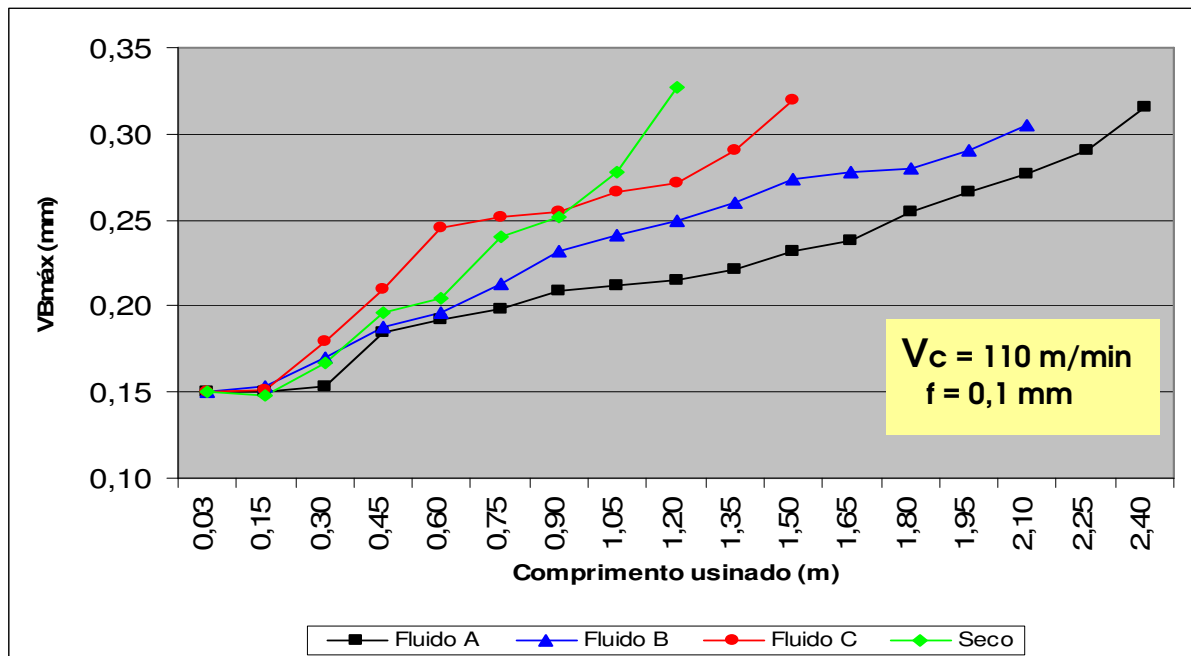


Figura 5.1 – Curvas de desgastes obtidas para condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e a Seco.

Segundo ASM (1991) e Aronson (1994), os meios lubri-refrigerantes emulsionáveis, como é o caso dos meios A e B que apresentaram os melhores resultados, apresentam um moderado poder lubrificante em virtude de sua formulação, ou seja, com base de óleo mineral. Outro fator relevante que propiciou o melhor desempenho das brocas foi o aditivo EP que também está presente na formulação dos meios lubri-refrigerantes A e B, como se observa adiante. Já uma análise com a referência, no caso a condição a seco, os meios lubri-refrigerantes obtiveram vantagens significativas, tal fato também foi observado por Sales (1999) onde aponta o melhor rendimento da furação com emulsão em relação à furação a seco.

Para a caracterização do desgaste das ferramentas, utilizou-se a análise por microscópio eletrônico de varredura (MEV). Nessa análise detectaram-se a abrasão e a adesão como causas do desgaste das ferramentas utilizadas no experimento, conforme apresentado na Figura 5.2. Os ensaios mostram repetibilidade dos mecanismos de desgaste nas faces e nos flancos de cada broca.

Ranhas provocadas por abrasão

Ranhas provocadas por abrasão

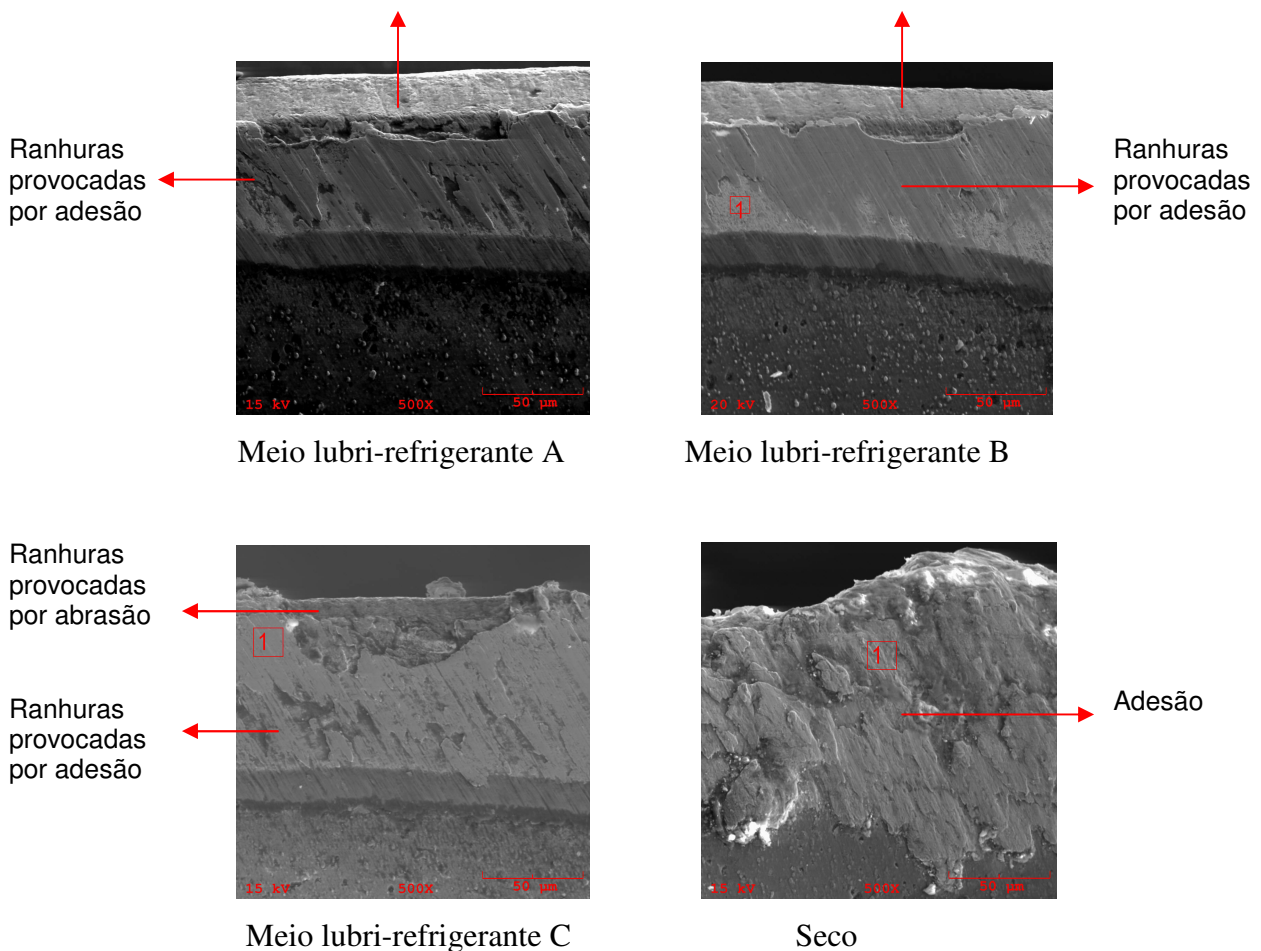


Figura 5.2 – Caracterização dos desgastes das brocas para as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e a Seco. Velocidade de Corte = 110 m/min. Aumento da imagem igual a 500x.

Conforme Lin e Ting (1994), o desgaste abrasivo ocorre quando uma superfície dura desliza sobre uma superfície de menor dureza, produzindo, conseqüentemente, ranhuras na superfície de dureza inferior.

Segundo Abele, Sahm e Shulz (2002) o ferro fundido vermicular é aproximadamente de 15% a 33% mais abrasivo que o ferro fundido cinzento. Já o desgaste por adesão é oriundo da ruptura de microcaldeamentos gerados na face da ferramenta, sendo esses caldeamentos advindos da interação das superfícies do cavaco com a face da ferramenta ou em função de forças elevadas (König, 1997).

5.3 Diâmetro

A Figura 5.3 apresenta o gráfico das médias dos diâmetros nas condições de início e final de vida das brocas para usinagem com cada meio lubri-refrigerante e a seco.

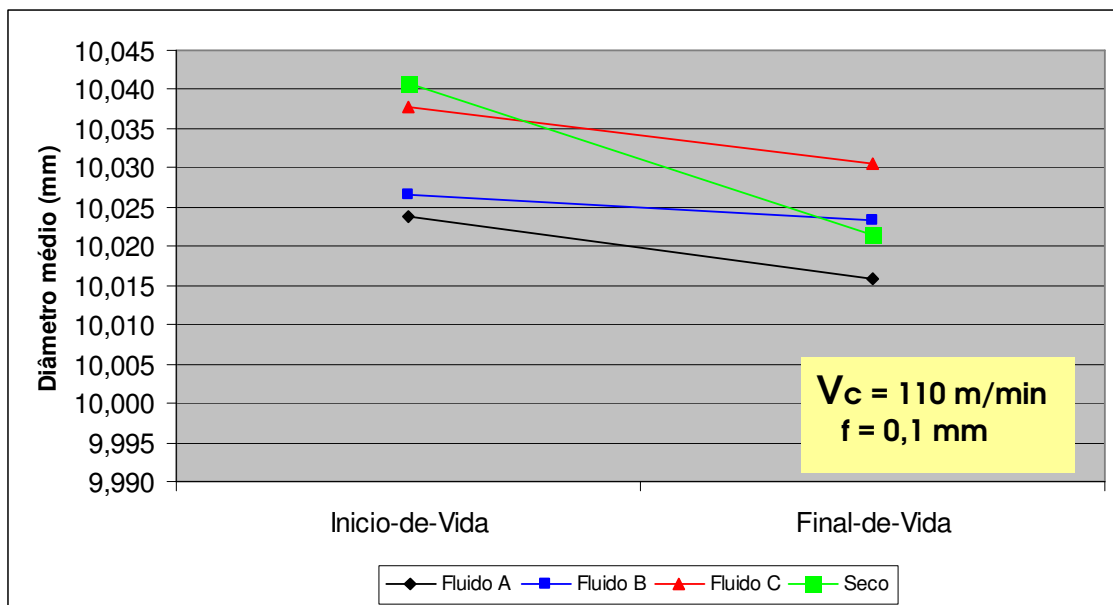


Figura 5.3 – Diâmetro médio no início e fim de vida das condições utilizadas no experimento sob velocidade de corte de 110 m/min.

Observou-se uma diminuição do diâmetro do início ao final do furo para as condições de usinagem a seco e com os meios lubri-refrigerantes A, B e C. Um fator relevante para a diminuição do diâmetro do furo é o desgaste progressivo da broca ao longo de sua vida (Teixeira, 2001; Wang, 1997). Andrade (2005) comprovou tal fato em seu experimento, relatando que o diâmetro do furo geralmente reduz-se proporcionalmente ao desgaste da broca em função da abrasividade do ferro fundido vermicular. Também foi observada por Castillo (2005) uma tendência de leve redução na dimensão do diâmetro dos furos na usinagem de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos.

Verifica-se pela Figura 5.4 que a usinagem a seco e com o meio lubri-refrigerante C levaram à maior média dos resultados, com valores em torno de 10,04 mm; a condição a seco acarretou também a maior dispersão de resultados, entre 10,02 e 10,04 mm, caracterizando a pior condição para este experimento. Os meios lubri-refrigerantes A e B, por sua vez, resultaram nas menores médias, as quais foram respectivamente 10,02 e 10,03 mm. Além disso, nota-se uma menor dispersão de resultados, ou seja, aproximadamente 10,02 mm a 10,03 mm para os dois meios. Tais diferenças de resultados se devem as melhores propriedades de lubrificação que os meios lubri-refrigerantes A e B possuem em relação ao meio lubri-refrigerante e a condição a seco.

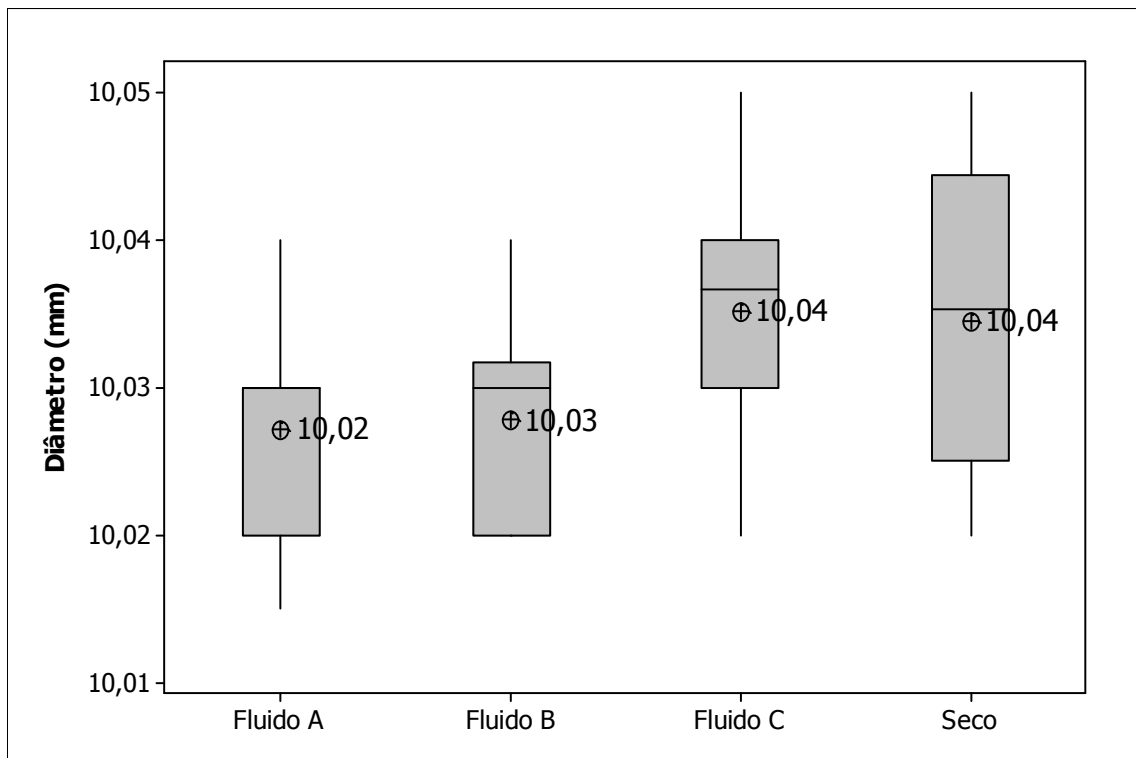


Figura 5.4 – Gráfico Boxplot de Diâmetro entre as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes, A, B, C e Seco. Velocidade de Corte = 110 m/min.

5.4 *Circularidade*

A circularidade foi medida em três profundidades, 3 mm, 14 mm e 26 mm. A Figura 5.5 apresenta os resultados obtidos no início de vida da broca e mostra semelhanças entre as condições utilizadas, com valores de circularidade entre 0,010 e 0,012 mm.

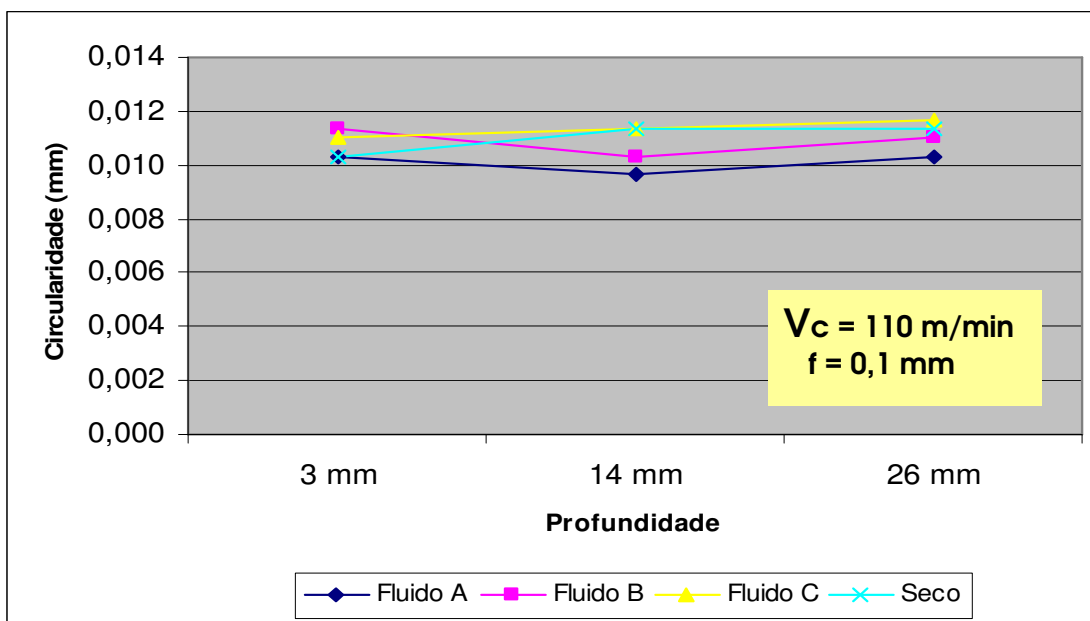


Figura 5.5 – Circularidade média obtida no início de vida das condições utilizadas no experimento. Velocidade de corte = 110 m/min.

Já na Figura 5.6, que mostra os resultados de circularidade no final de vida da broca, pode-se inferir que houve variações nos valores de circularidade, sendo que para os meios lubri-refrigerante A e B os valores resultantes estão entre 0,011 e 0,013 mm e, nas condições a seco e com o meio lubri-refrigerante C, os valores situam-se entre 0,012 e 0,014 mm.

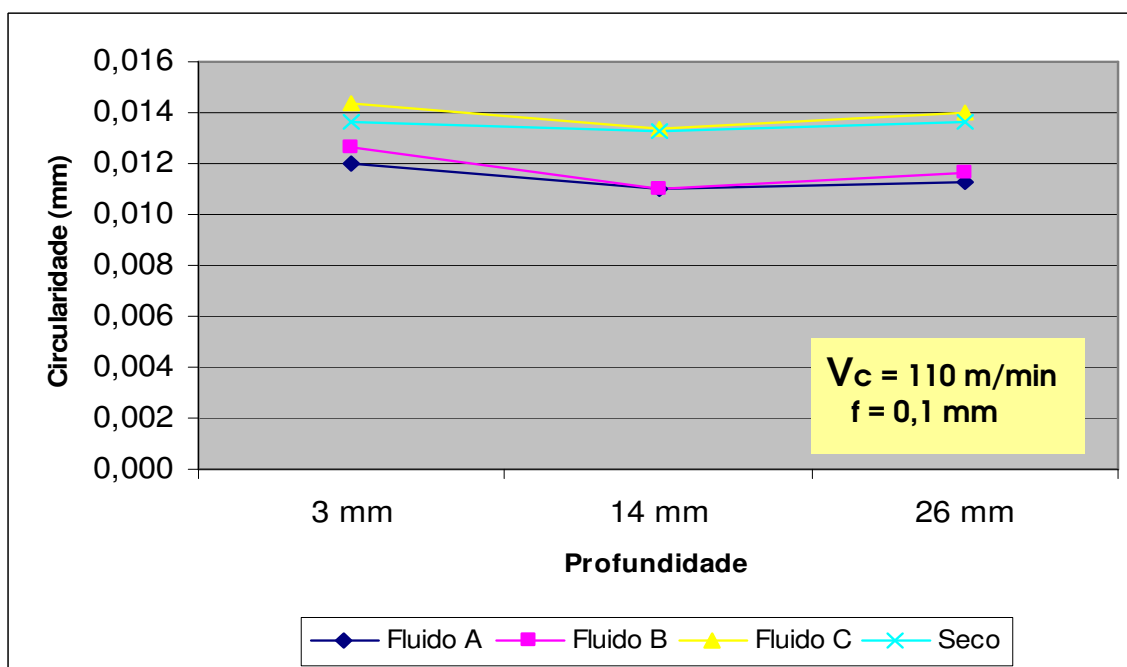


Figura 5.6 – Circularidade média obtida no fim de vida das condições utilizadas no experimento. Velocidade de corte = 110 m/min.

Os resultados observados estão associados ao desgaste da ferramenta, que é o maior responsável pela dispersão nos valores de circularidade do furo. Em geral, brocas em início de vida apresentam melhores resultados de circularidade se comparados aos em final de vida, uma vez que brocas novas apresentam maior estabilidade no corte (Andrade, 2005; El-Khabeery M. *et al*, 1990; Wick, 1988).

Através do gráfico Boxplot, ilustrado na Figura 5.7, foram verificados os menores valores de circularidade com os meios lubri-refrigerantes A e B, apresentando uma média de 0,012 mm. No entanto, a usinagem com o meio lubri-refrigerante A foi a condição que apresentou menor dispersão de resultados, definidos entre 0,011 a 0,013 mm. Em contrapartida, as condições a seco e com o meio lubri-refrigerante C mostraram as piores condições para esta comparação, com uma média de 0,013 mm e dispersão dos resultados entre 0,012 a 0,014 mm. Os resultados obtidos com os meios lubri-refrigerantes A e B podem ser imputados às boas propriedades de refrigeração e lubrificação quando comparadas ao meio lubri-refrigerante C e com a condição a seco. Tais benefícios acarretam uma menor dilatação térmica dos furos e um corte mais suave, resultando em melhores valores de circularidade para este experimento.

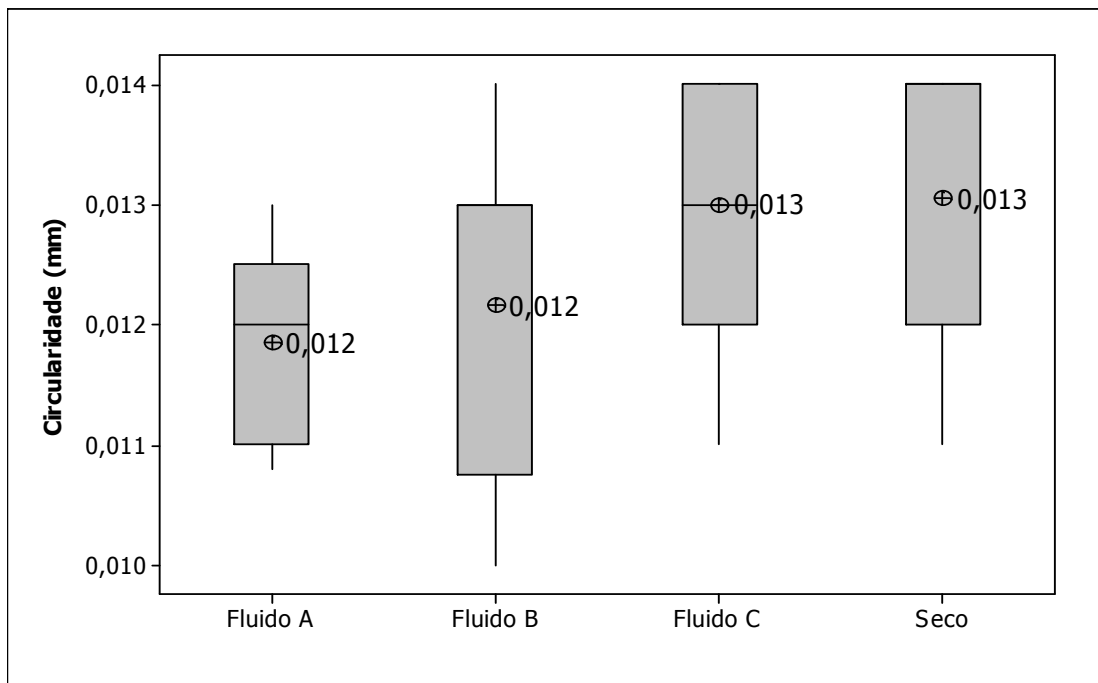


Figura 5.7 – Gráfico Boxplot de Circularidade obtido no fim de vida entre as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e Seco. Velocidade de Corte = 110 m/min.

Na indústria, em operações de furação, os erros de forma de furos normalmente não têm grande importância, uma vez que os furos que exigem maior precisão em sua forma são usualmente submetidos a operações de alargamento. Por outro lado, a obtenção de um furo de boa qualidade de forma e diâmetro pode eliminar a necessidade de operações adicionais de processamento. Neste trabalho, os estudos dos erros de forma compreendem um conjunto de dados adicional para quantificação dos resultados obtidos com os diferentes meios lubri-refrigerantes testados.

Conforme Andrade (2005), a medição de circularidade de furos com diâmetros relativamente pequenos, como produzidos neste trabalho, não se aplica na indústria. Andrade (2005) afirma ainda que os resultados obtidos podem ser extrapolados para a operação convencionalmente denominada de mandrilamento de cilindros, por exemplo, de blocos de motor em barras de ferramentas com dois ou mais gumes. Além disso, ele explica que a circularidade de cilindros fora de especificação de desenho pode conduzir ao problema de *blow by* (perda de potência) durante trabalho do motor.

5.5 *Retitude*

O gráfico Boxplot, mostrado na Figura 5.8, confirma que os melhores resultados de retitude foram alcançados com emprego dos meios lubri-refrigerantes A e B, com a média de retitude situando-se em torno de 0,004 mm e a dispersão dos valores entre 0,004 e 0,005 mm. Já o meio lubri-refrigerante C apresentou resultados intermediários, com média de 0,005 e dispersão entre 0,005 e 0,006 mm. A condição a seco, por sua vez, com uma média de 0,005 mm, acarretou a maior dispersão de resultados de retitude, com valores entre 0,003 e 0,007 mm.

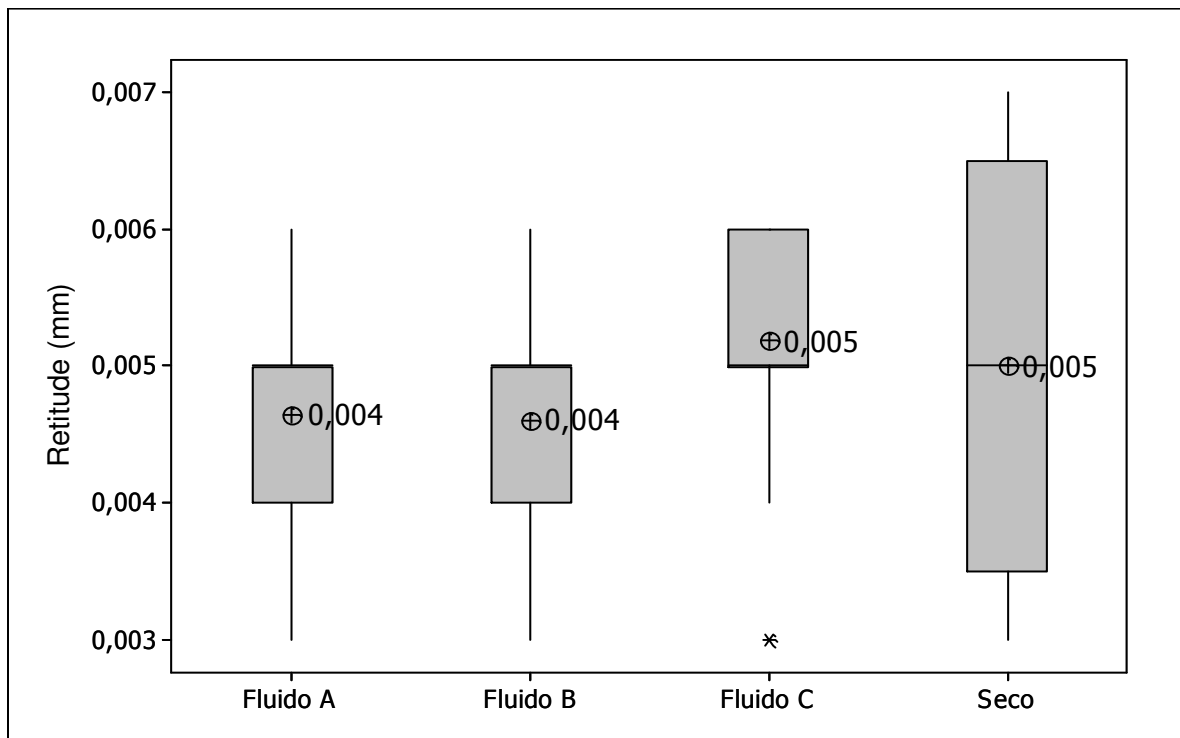


Figura 5.8 – Gráfico Boxplot de Retitude entre as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e Seco. Velocidade de Corte = 110 m/min.

O erro de retitude é proveniente do desgaste progressivo da broca ao longo de sua vida, além de oscilações e instabilidade da ferramenta no início do furo (Wang, 1997). Assim, concluiu-se que, com menores índices de atrito e de aquecimento da peça, a maior capacidade de lubrificação dos meios A e B conduziu a melhores resultados de retitude.

Conforme Andrade (2005), quando na indústria a retitude representa fator de rejeição do produto ou no processamento, geralmente se aplicam operações posteriores de usinagem de acabamento. Por isso, os valores atingidos neste estudo podem ser desprezados. Entretanto, se os furos possuem boa qualidade, podem ser utilizados como furos-guias para próximas operações.

5.6 *Cilindricidade*

Sendo o erro de cilindridade o resultado da sobreposição dos erros de circularidade e de retitude, é evidente que os meios lubri-refrigerantes A e B tenham apresentado resultados melhores em relação às condições de usinagem com o meio lubri-refrigerante C e a seco. A melhor capacidade de lubrificação dos meios lubri-refrigerante A e B, que permitiu melhores

resultados de circularidade e de retitude, evidencia-se também nos resultados de cilindridade obtidos.

Através do gráfico Boxplot, ilustrado pela Figura 5.9, é possível confirmar o melhor desempenho dos meios lubri-refrigerantes A e B, com média de 0,012 mm e a dispersão de valores entre 0,011 e 0,013 mm, quando comparados às outras condições utilizadas nesse experimento: meio lubri-refrigerante C, média de 0,012 mm com valores entre 0,011 e 0,014 mm; e a seco, com a média de 0,013 mm e dispersão de valores entre 0,011 e 0,015 mm.

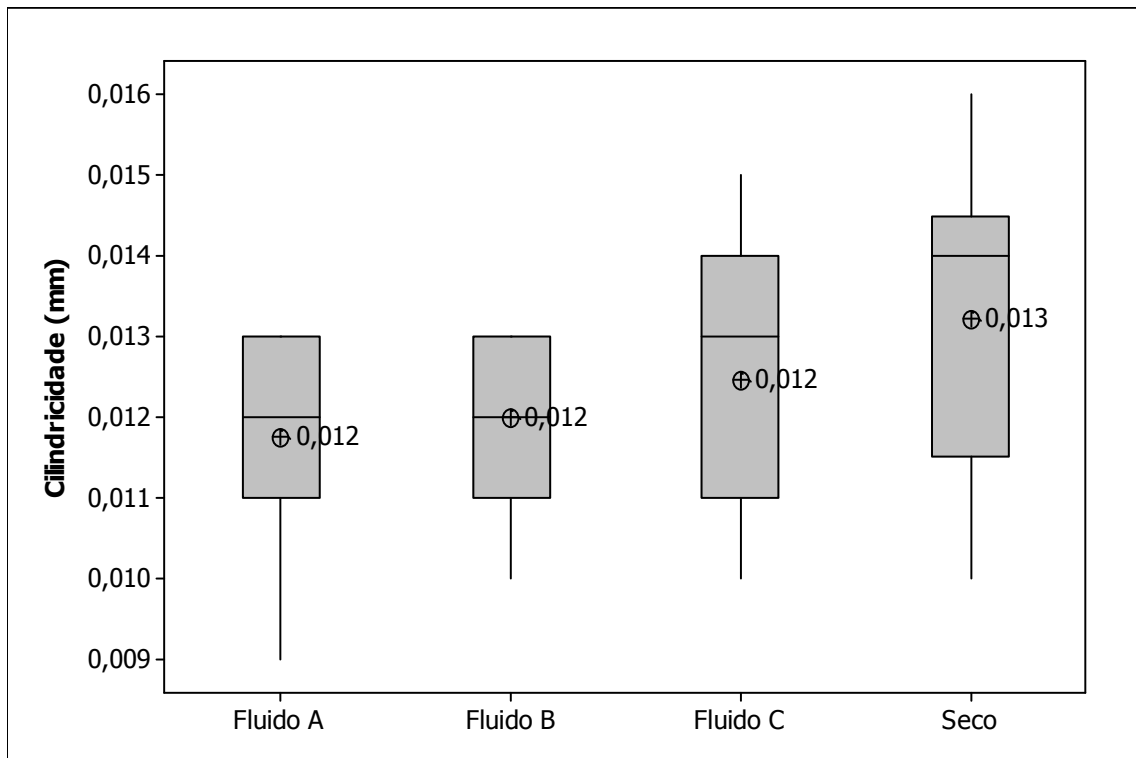


Figura 5.9 – Gráfico Boxplot de Cilindridade entre as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e a Seco. Velocidade de Corte = 110 m/min.

Os resultados de cilindridade obtidos indicam o desempenho de cada tipo de meio lubri-refrigerante. O erro de cilindridade está associado às forças de corte, que causam deformação e aquecimento da peça durante o processo de usinagem, e também aos altos esforços gerados pela remoção dos cavacos. Os meios lubri-refrigerantes A e B, que apresentaram melhores propriedades de lubrificação e conseqüentemente menor atrito da ferramenta com a peça, propiciaram menores erros de cilindridade. O menor aquecimento, por sua vez, está associado diretamente ao menor atrito da peça durante a usinagem, gerando, dessa forma, redução dos desgastes das ferramentas empregadas.

Segundo Coldwell (2004), os altos esforços de usinagem em furação estão associados aos altos valores de cilindridade, provenientes dos problemas da evacuação de cavacos.

Dessa forma, presume-se que os maiores valores de cilíndricidade obtidos na condição a seco estejam relacionados a esse fenômeno. Em contrapartida, os meios lubri-refrigerantes auxiliaram na obtenção dos melhores valores de cilíndricidade, pois conforme Aronson (1994) e Yushiro (2007) eles contribuem para uma melhor qualidade dos furos usinados, por facilitarem a remoção dos cavacos.

5.7 *Rugosidade*

Os resultados de rugosidade R_a e R_z são apresentados através do gráfico Boxplot, conforme ilustram as Figuras 5.10 e 5.11. Esses resultados foram obtidos para os mesmos intervalos de medição dos desgastes das ferramentas, ou seja, a cada 0,15 metros de furação, obtendo-se assim uma curva com o comportamento da rugosidade para cada condição testada.

Na Figura 5.10 são apresentados os resultados de rugosidade R_a para as quatro condições de usinagem testadas. A mesma mostra que os melhores resultados foram obtidos com os meios lubri-refrigerantes A e B, com médias de 3,44 e 3,48 μm , respectivamente, e com dispersão de valores entre 3,30 e 3,60 μm . O meio lubri-refrigerante C apresentou uma maior dispersão, embora os resultados (média) tenham sido próximos às duas condições comentadas anteriormente. Já a condição a seco acarretou o pior resultado, com a média de 3,73 μm e a dispersão entre 3,40 e 4,00 μm . Segundo Teixeira (2001), a ação dos lubrificantes reduz o atrito entre a parede do furo e a guia da ferramenta.

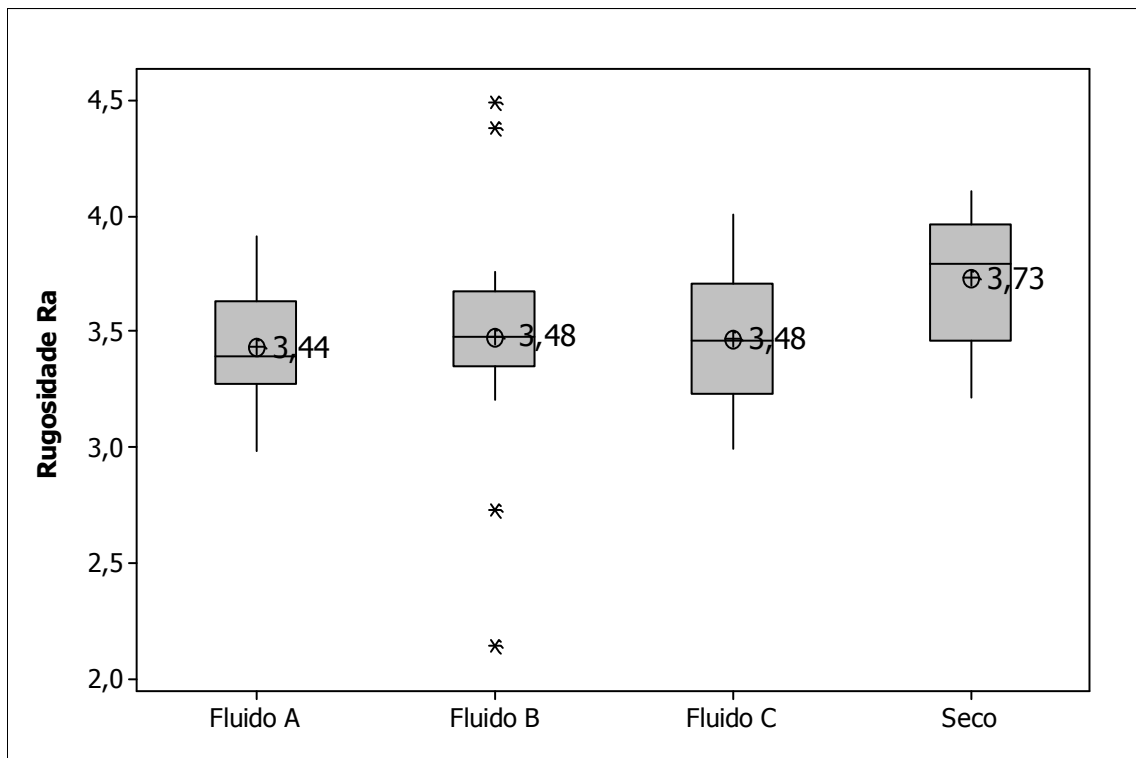


Figura 5.10 – Gráfico Boxplot de Rugosidade R_a entre as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e a Seco. Velocidade de Corte de 110 m/min.

Os resultados da Rugosidade R_z são apresentados na Figura 5.11 e mostram que a condição com o meio lubri-refrigerante B permitiu a obtenção do melhor resultado médio, com valores em torno de 22,8 μm . No entanto, o meio B apresentou também a maior dispersão de valores, entre 20 a 26 μm . Já os meios lubri-refrigerantes A e C, com médias de 24 e 24,2 μm , respectivamente, apresentaram valores muito semelhantes, atingindo dispersões em valores de 22 a 26 μm , evidenciando um bom desempenho e estabilidade dos resultados ao longo do experimento. Com o emprego da condição a seco foi verificada a maior dispersão de resultados, de 24 a 28 μm , sendo a média 26,4 μm , o que caracterizou a pior condição para esta avaliação.

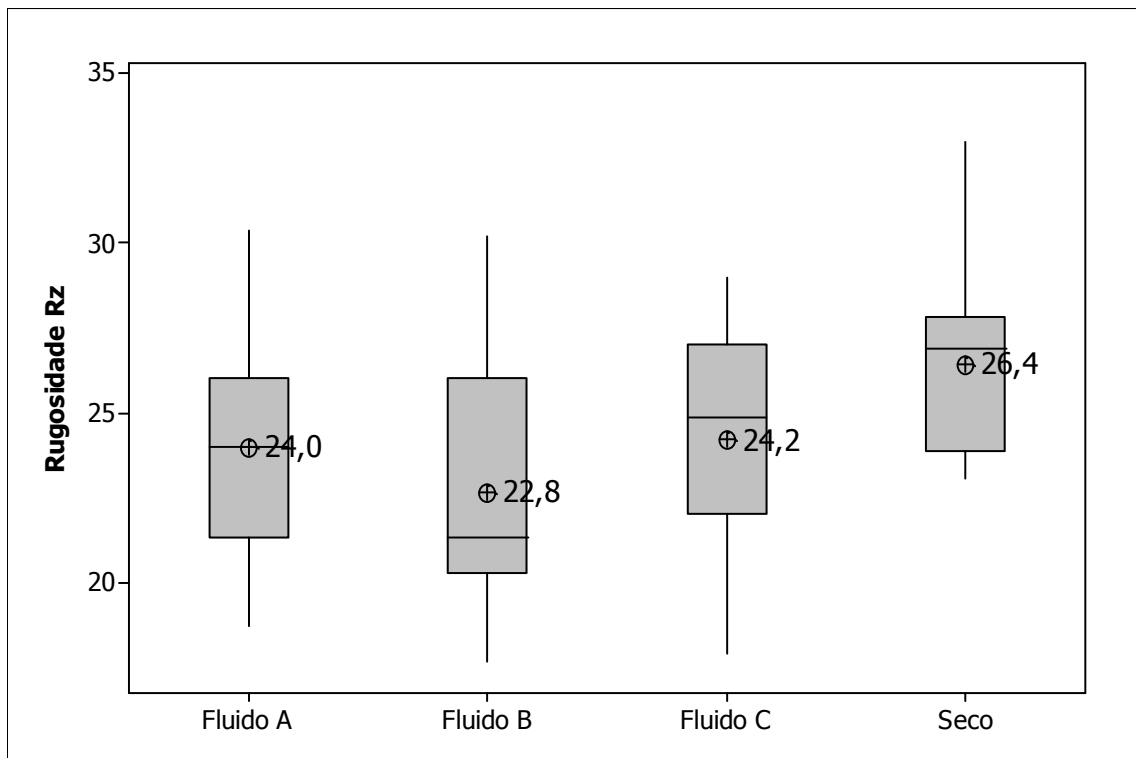


Figura 5.11 – Gráfico Boxplot de Rugosidade Rz entre as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e Seco. Velocidade de Corte de 110 m/min.

Conforme Haan *et al* (1997) o emprego dos meios lubri-refrigerantes é significativo na qualidade de acabamento da superfície do furo, pois favorece a formação do cavaco, auxilia no arraste do cavaco, diminui o calor gerado pelo atrito, reduz o desgaste da ferramenta e do consumo de energia e proporciona o fornecimento de refrigeração que reduz o calor sem permitir que ocorram alterações dimensionais nas peças.

As Figuras 5.12 e 5.13 ilustram que as dispersões dos resultados de rugosidades R_a e R_z para a superfície são maiores no final de vida da ferramenta do que no início de vida, principalmente na usinagem a seco. Isso evidencia o fato de que a perda do revestimento e/ou uma simples deterioração do gume da ferramenta está diretamente relacionada aos resultados de texturas das superfícies, devido ao maior coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta. Portanto, conforme já comentado anteriormente, os meios lubri-refrigerantes são cruciais para a conservação do revestimento da ferramenta.

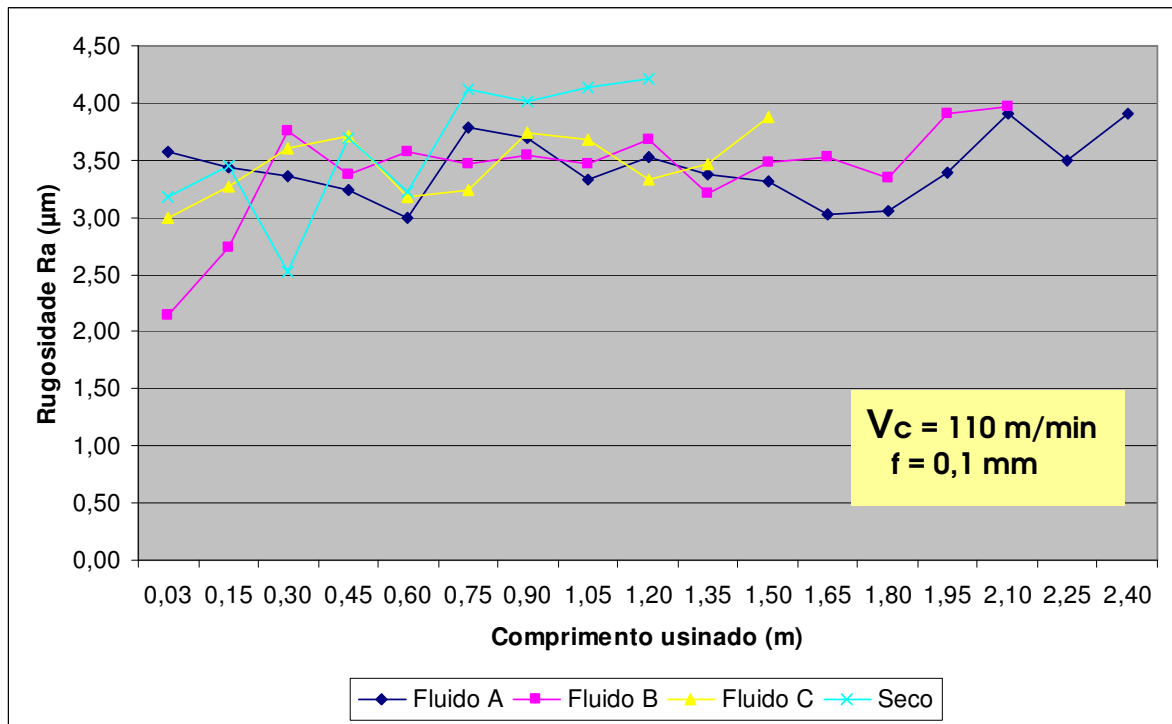


Figura 5.12 – Rugosidade R_a média das condições utilizadas no experimento. Velocidade de corte = 110 m/min.

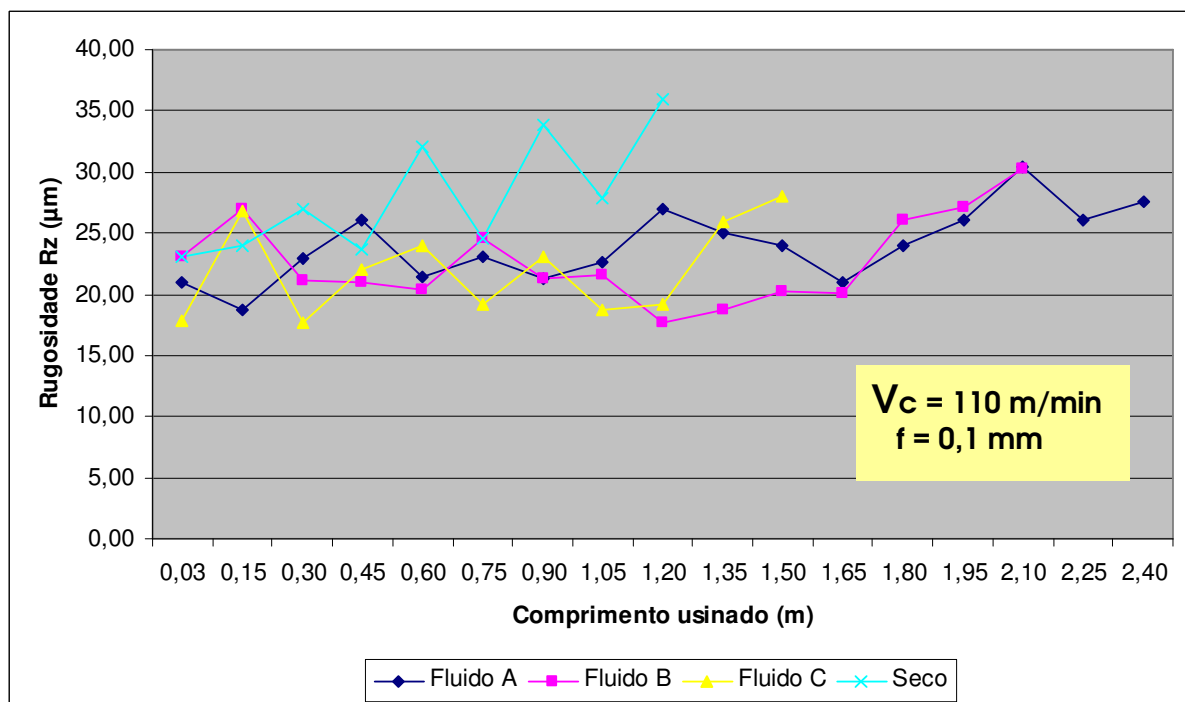


Figura 5.13 – Rugosidade R_z média das condições utilizadas no experimento. Velocidade de corte = 110 m/min.

5.8 Análise do desempenho dos meios lubri-refrigerantes através da análise do revestimento das brocas

Para avaliar a repetibilidade dos mecanismos de desgastes adotou-se o critério de análise visual das brocas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por micro-sonda (EDS), nas faces e flancos das mesmas para cada experimento.

A Figura 5.14 apresenta a região da ferramenta utilizada para as análises, sendo essa dividida em três regiões:

- 1) Área próxima do gume;
- 2) Interface;
- 3) Área revestida.

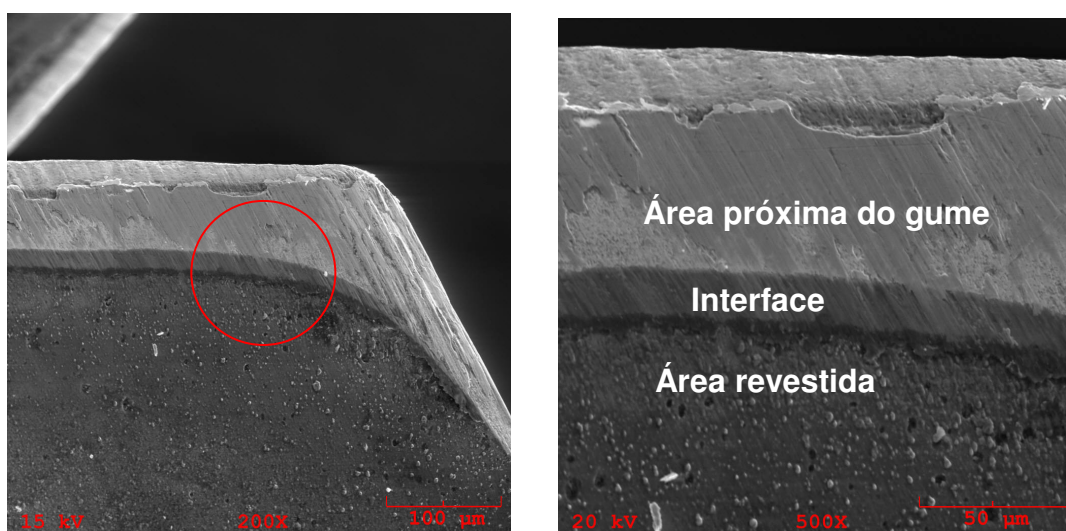


Figura 5.14 – Região da ferramenta utilizada para as análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por micro-sonda (EDS).

A Tabela 5.1 apresenta um resumo do percentual médio de peso (massa) de elementos encontrados na face das brocas. Deve-se observar que a soma não resulta em 100%, em função do percentual residual que está dividido entre os elementos residuais oriundos do meio lubri-refrigerante e impurezas não eliminadas durante a limpeza da superfície realizada antes das análises por microscopia eletrônica de varredura.

Tabela 5.1 – Percentual médio de peso de elementos encontrados na face das brocas revestidas no final de vida da broca, em regiões próximas ao gume de corte.

Condições utilizadas para o experimento	v_c (m/min)	Fe (%)	Ti (%)	Al (%)	Si (%)	Mg (%)	Mn (%)	W (%)	Co (%)	S (%)
Meio lubri-refrigerante A	110	1,99	59,49	19,18	0,59	0,59	0,13	0,84	0,12	0,03
Meio lubri-refrigerante B	110	1,20	58,48	19,16	0,45	0,33	0,07	1,21	0,05	0,02
Meio lubri-refrigerante C	110	1,30	51,15	13,88	0,39	0	0	0	0,10	0
A Seco	110	89,67	0,09	0,14	1,75	0	0	0	0	0

5.8.1 Resultados das análises por microscopia eletrônica de varredura e por micro sonda.

Todas as brocas utilizadas no experimento foram submetidas às análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por micro-sonda (EDS) com a finalidade de se avaliar as ferramentas sob a ação de cada meio lubri-refrigerante.

A Figura 5.15 refere-se à análise da condição a seco, que mostra uma grande concentração do elemento ferro na ferramenta de corte, aproximadamente 90%. Essa evidência caracteriza que a adesão foi o principal fator de desgaste para a condição.

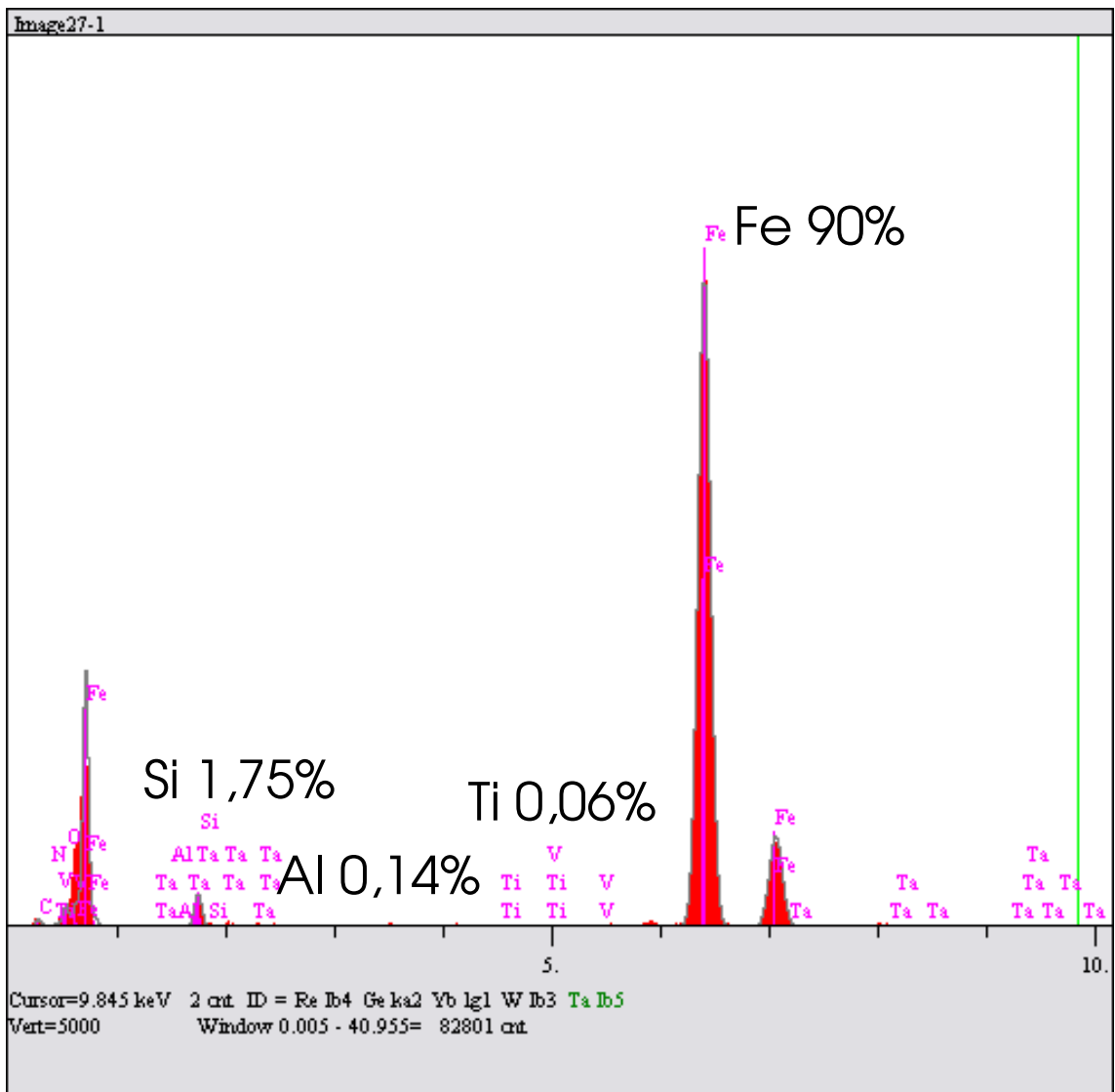


Figura 5.15 - Exemplos do resultado do espectro das análises da superfície da ferramenta após fim-de-vida na condição a seco, sob $v_c = 110$ m/min.

Para o meio lubri-refrigerante C, os principais elementos encontrados foram o titânio (51,2%) e o alumínio (13,9%), o que evidencia que a ferramenta não perdeu completamente o revestimento, visto que estes elementos são integrantes do revestimento da ferramenta de corte utilizada para o experimento, conforme Figura 5.16. Contudo, o meio lubri-refrigerante C garantiu uma maior vida quando comparado à condição a seco.

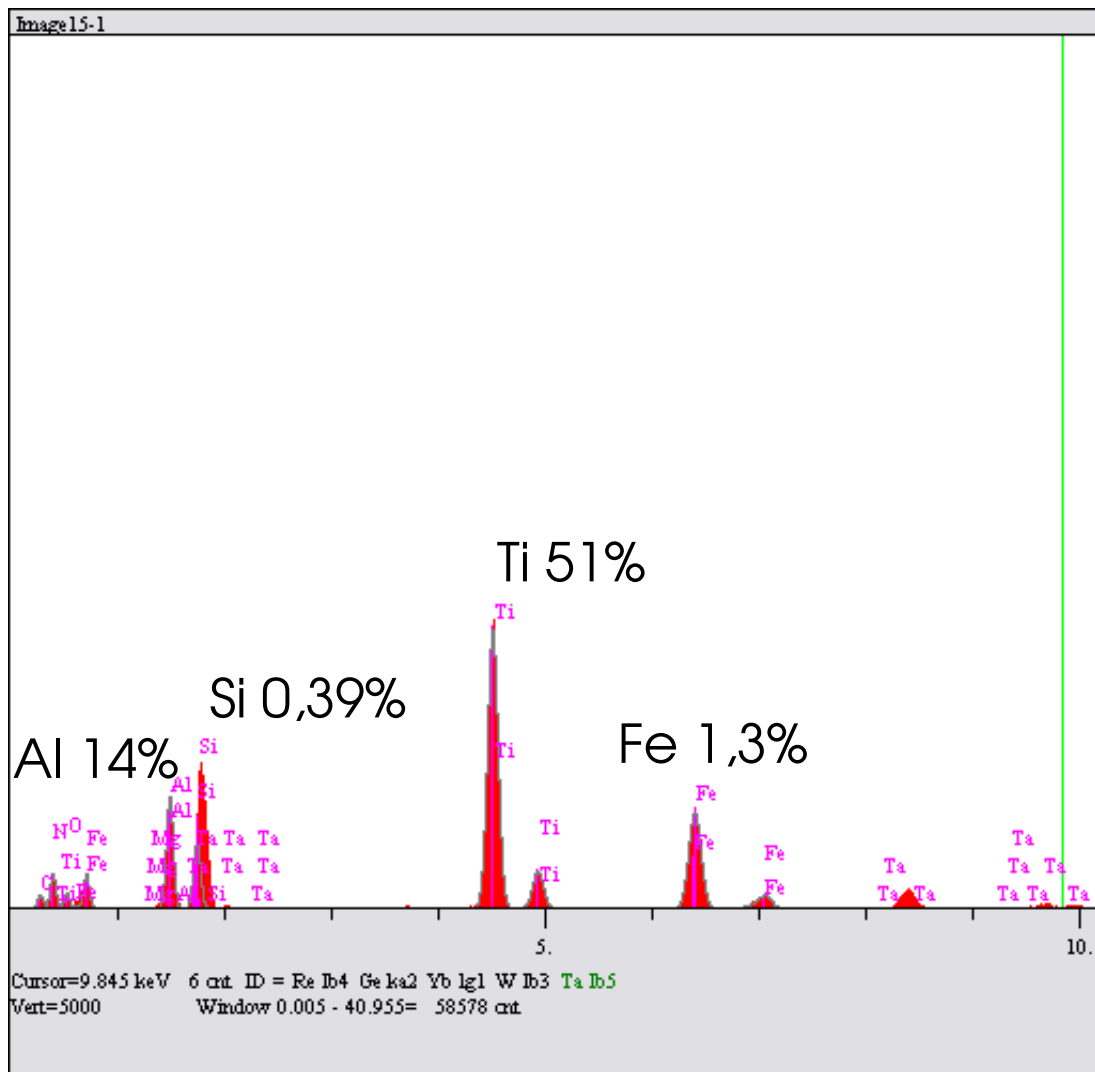


Figura 5.16 - Exemplos do resultado do espectro das análises da superfície da ferramenta após fim-de-vida para o meio lubri-refrigerante C, sob $v_c = 110$ m/min.

Para os meios lubri-refrigerantes A e B, também foram encontrados os elementos titânio (59,5% e 58,5%) e alumínio (19,2% e 19,2%), conforme as Figuras 5.17 e 5.18, porém, com maior intensidade quando comparado ao meio lubri-refrigerante C.

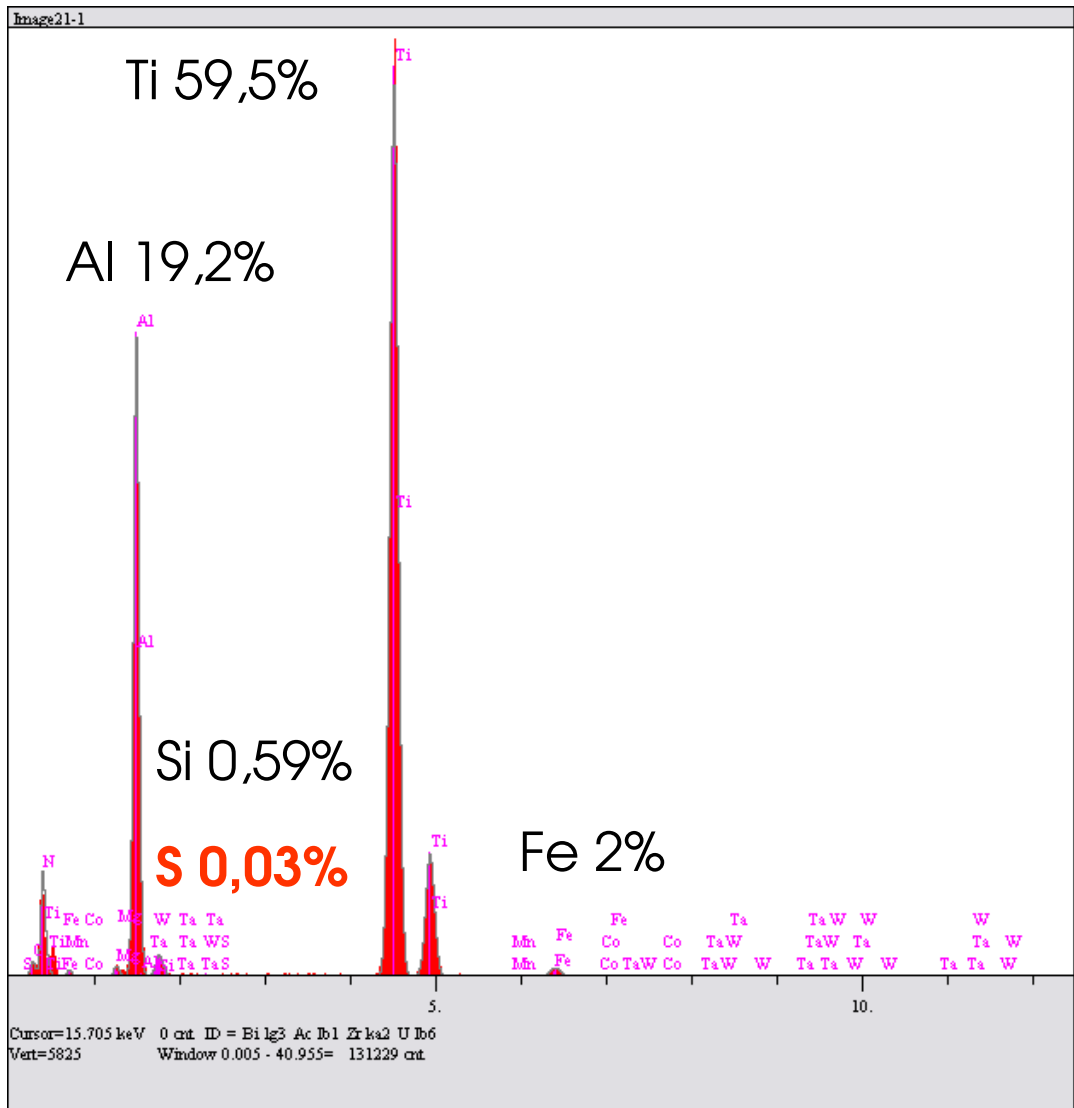


Figura 5.17 - Exemplos do resultado do espectro das análises da superfície da ferramenta após fim-de-vida para o meio lubri-refrigerante A, sob $v_c = 110$ m/min.

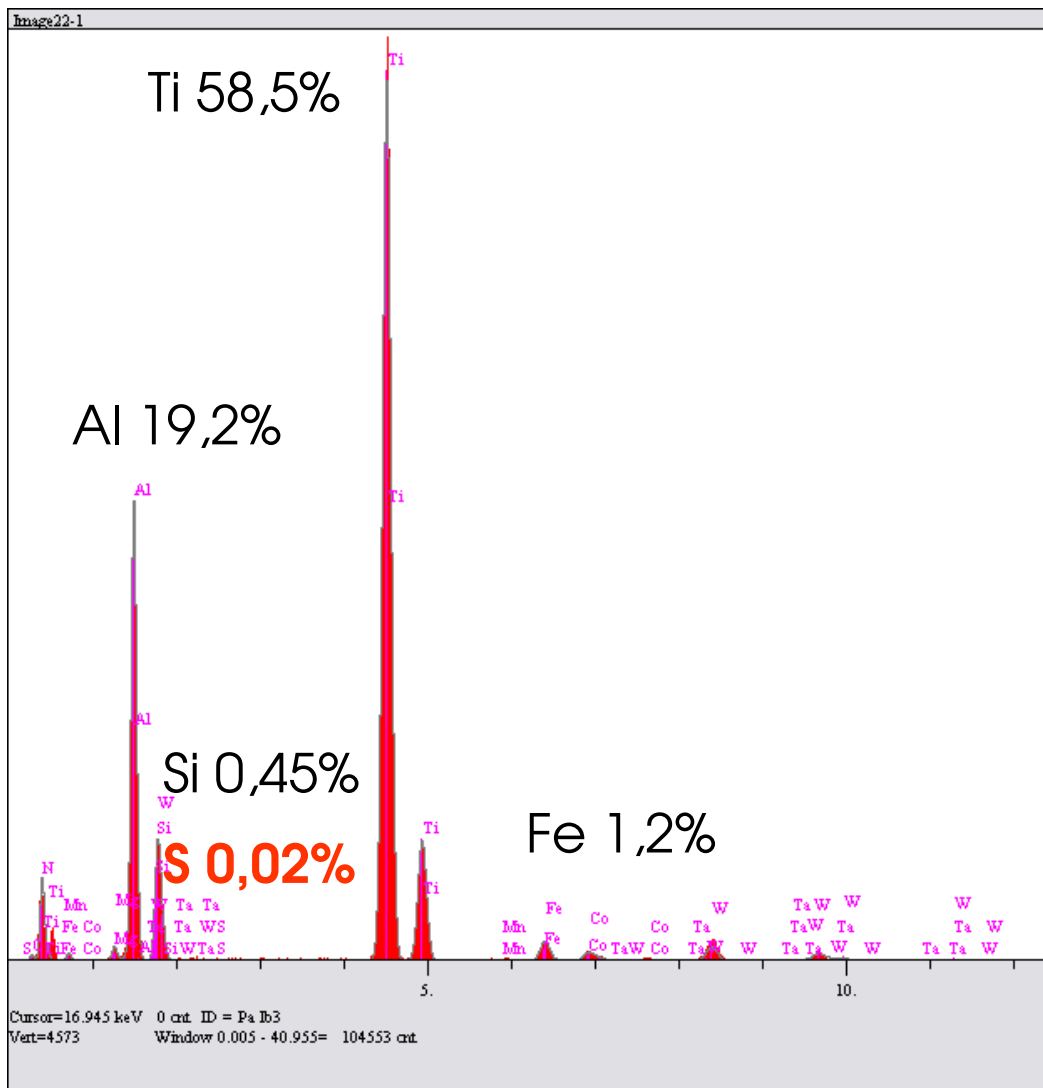


Figura 5.18 - Exemplos do resultado do espectro das análises da superfície da ferramenta após fim-de-vida para o meio lubri-refrigerante B, sob $v_c = 110$ m/min.

Além dos elementos titânio e alumínio citados anteriormente, também foi encontrado nos resultados do espectro o elemento enxofre (0,03% e 0,02%). Segundo Mang e Dresel (2007) o enxofre é proveniente da reação química entre os elementos da ferramenta e do aditivo EP, que proporciona um baixo coeficiente de atrito. O mesmo ocorre através de reações químicas que reagem em altas temperaturas (200 a 1000°C) na região de corte, reagem triboquimicamente com o metal exposto durante o processo mecânico, desenvolvem uma boa aderência e formam uma camada protetora entre a peça e a ferramenta de corte. Tal fato acarretou uma maior eficiência dos meios lubri-refrigerantes A e B, permitindo às ferramentas maiores vidas úteis quando comparadas à condição a seco e meio lubri-refrigerante C. A Figura 5.19 apresenta um esquema simples das fases que geram a formação da camada protetora. Em resumo, numa primeira fase ocorre a adsorção física entre o óleo base (R = radicais) e o enxofre (S), depois a segunda fase é caracterizada pela quimisorção,

que significa uma reação química entre a superfície da ferramenta de corte com o enxofre ainda presente no lubrificante e finalizando com a clivagem, sendo esta fase a separação do lubrificante do aditivo EP. A separação desses dois elementos forma um filme nanométrico de enxofre entre a peça e ferramenta de corte, que conforme já descrito acima, auxilia na proteção da ferramenta de corte quando sujeitas a operações severas (Mang e Dresel, 2007).

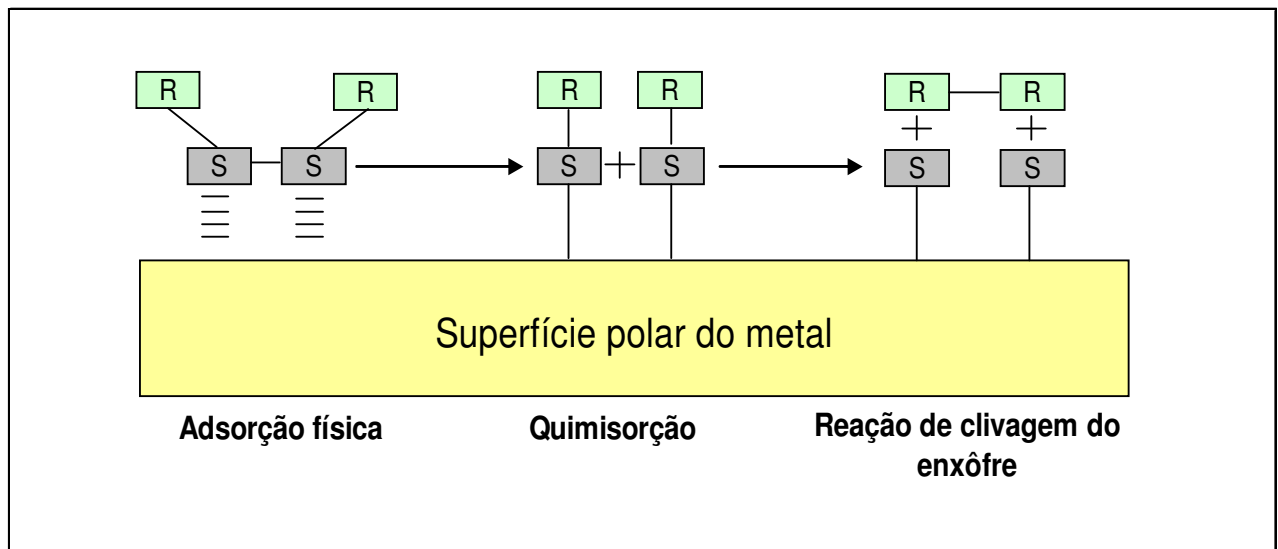


Figura 5.19 - Esquema que caracteriza a formação da camada protetora entre a ferramenta de corte e peça (Mang e Dresel, 2007).

5.8.2 *Análise microestrutural da parede do furo após usinagem*

A Figura 5.20 demonstra que as constituintes microestruturais do ferro fundido vermicular não foram afetadas independentemente do meio de refrigeração estudado ou sem ele. Ou seja, através do método visual verifica-se que os constituintes originais do ferro fundido vermicular foram mantidos, e não houve a formação de outro constituinte adicional, como a martensita. Ocorreu apenas encruamento das paredes dos furos usinados, sendo este comum nas operações de usinagem, segundo Stemmer (2001).

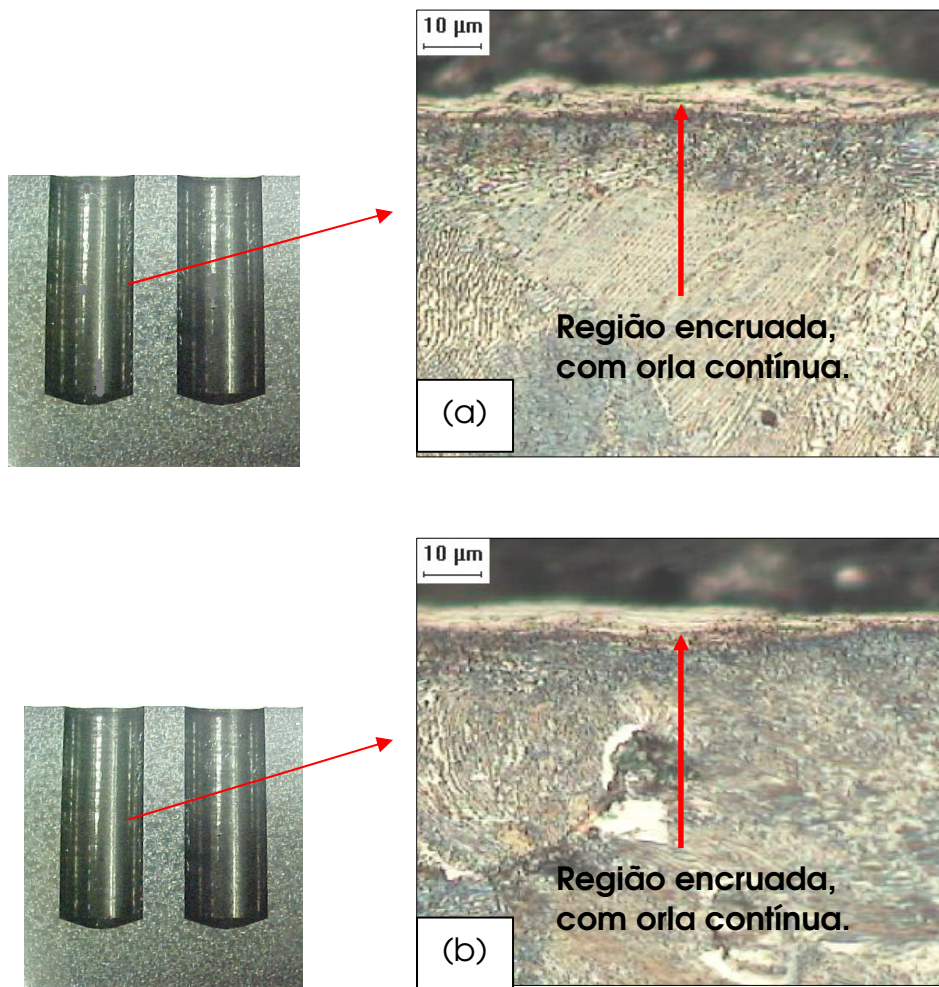


Figura 5.20 – Encruamento da parede do furo após usinagem à $v_c=110$ m/min: (a) parede do primeiro furo usinado; (b) parede do último furo usinado. Aumento de 1000x.

As análises foram efetuadas nos três primeiros furos e nos três últimos furos determinados pela vida da ferramenta, sabendo-se que os maiores esforços e temperaturas de corte são produzidos nas condições de fim-de-vida da broca em função do maior índice de desgaste do gume.

A Tabela 5.2 apresenta os valores e as características encontradas para cada condição de usinagem, a seco e com os meios lubri-refrigerante A, B e C. No entanto, não é possível relatar que houve qualquer influência das condições de usinagem sobre a integridade superficial da peça usinada em 8 amostras, sendo uma amostra no início de vida e outra no final de vida de cada ferramenta.

Tabela 5.2 – Análise dimensional e visual das regiões encruadas dos furos, $v_c = 110$ m/min.

Condição de Usinagem	Amostra / Furo	Espessura Média da	
		Orla com Encruamento do Material (μm)	Observações
Seco	Primeiro Furo	3,68	Apresenta uma orla uniforme
	Último Furo	4,54	Apresenta uma orla uniforme
Meio lubri-refrigerante A	Primeiro Furo	3,45	Apresenta uma orla descontínua
	Último Furo	4,89	Apresenta uma orla uniforme
Meio lubri-refrigerante B	Primeiro Furo	3,12	Apresenta uma orla descontínua
	Último Furo	4,28	Apresenta uma orla uniforme
Meio lubri-refrigerante C	Primeiro Furo	2,96	Apresenta uma orla descontínua
	Último Furo	4,05	Apresenta uma orla uniforme

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

As conclusões sobre o desempenho de diferentes meios lubri-refrigerantes na furação de ferro fundido vermicular com brocas helicoidais foram obtidas através da análise de resultados de desgaste de flanco VB e VB_{max} . Também foram analisados os erros de circularidade, das rugosidades R_a e R_z , do diâmetro, da cilindricidade e da retitude. As caracterizações dos mecanismos de desgaste atuantes na usinagem foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura e por espectrometria.

a) Desgaste de flanco VB e VB_{max}

Conforme já informado no Capítulo 4, o padrão de referência para os ensaios com os meios lubri-refrigerantes foi a condição a seco. Desta forma, conclui-se que o uso do meio lubri-refrigerante A resultou no maior tempo de vida da ferramenta, com rendimento 50% maior. Já o uso do meio lubri-refrigerante B levou, por sua vez, ao segundo melhor resultado com um rendimento de aproximadamente 45%. Porém, com o meio lubri-refrigerante C obteve-se um rendimento de 20% apenas comparado à condição a seco, concretizando o pior resultado para a análise deste experimento. Tais diferenças são provenientes das melhores propriedades de lubrificação que os meios lubri-refrigerantes A e B dispõem, quando comparados ao meio lubri-refrigerante. Tal fato será discutido futuramente.

b) Diâmetro

Para todas as condições utilizadas, observou-se uma diminuição do diâmetro do início para o final do furo. Tal fato ocorre em função principalmente do desgaste progressivo da ferramenta ao longo do furo, em função da abrasividade do ferro fundido vermicular.

Em geral, o meio lubri-refrigerante A apresentou valores menores de variação de diâmetro e uma menor dispersão de resultados quando comparado às demais condições utilizadas neste experimento para o mesmo comprimento usinado. Esses resultados são atribuídos a um desgaste menor ao longo da vida da ferramenta em função das melhores propriedades de lubrificação, as quais viabilizaram um menor atrito da broca com a peça e propiciaram menores erros de diâmetro.

c) Erros de forma dos furos

A medição dos erros de forma de furos obtidos permitiu uma comparação entre os diferentes meios lubri-refrigerantes empregados. Foram avaliadas as características de circularidade, retitude e cilindridade. Observou-se que as melhores propriedades de lubrificação dos meios lubri-refrigerantes A e B permitiram a obtenção de furos com menores erros de forma, o que se deve ao menor atrito da ferramenta com a peça, à menor geração de calor durante a furação e, conseqüentemente, a uma menor deformação do furo. Adicionalmente, os meios lubri-refrigerantes A e B geraram menor desgaste da ferramenta, o que também contribuiu para a redução de forças de corte e de calor. O meio lubri-refrigerante C, apesar de boa capacidade de refrigeração, não permitiu a obtenção de bons resultados, sendo comparável à condição a seco. Concluiu-se, assim, que nas condições testadas para a obtenção dos melhores resultados de forma a capacidade de lubrificação do meio lubri-refrigerante foi mais relevante que sua capacidade de refrigeração.

d) Rugosidades R_a e R_z

Dentre as condições utilizadas no experimento, a qualidade da superfície obtida no emprego dos três tipos de meios lubri-refrigerantes foi satisfatória até o final de vida de cada ferramenta, sendo que os valores de rugosidade R_a oscilaram entre 3 e 4 μm . Porém, para a condição a seco, notou-se uma tendência crescente no fim de vida da ferramenta, atingindo o resultado de 4,5 μm . O mesmo ocorreu para os resultados de rugosidade R_z , nos quais as condições com emprego dos meios lubri-refrigerantes apresentaram os melhores intervalos, entre 19 e 26 μm . A condição a seco também se manteve com os piores índices de rugosidade, oscilando de 24 a 35 μm . Além disso, para todas as condições observou-se uma tendência de aumento da rugosidade do início para o final de vida de cada broca, mais acentuada na condição a seco. Tal fato ocorre devido à grande quantidade de material aderido no gume da broca e também pelo arredondamento da quina já desgastada.

e) Análise por MEV e espectrometria

Através das análises químicas com a micro-sonda EDS foi possível ter um bom entendimento dos mecanismos de desgaste atuantes para as condições utilizadas neste experimento. Através das análises detectou-se que o principal mecanismo de desgaste na furação do ferro fundido vermicular foi a abrasão, porém, alguns sinais de adesão do material usinado foram observados nas ferramentas.

Observou-se, então, que o meio lubri-refrigerante A apresentou o melhor resultado entre as condições utilizadas para este experimento. Este meio lubri-refrigerante é uma

mistura de óleo mineral (35%), éster (10%) e aditivo EP (10%). Também apresentou bons resultados o meio lubri-refrigerante B, que possui uma composição semelhante ao meio lubri-refrigerante A, muito embora haja um acréscimo da quantidade de óleo mineral (45%) e aditivo EP (5%) em sua composição. No entanto, quando se retira o aditivo EP e substitui-se o óleo base por óleo mineral por polímero, o meio lubri-refrigerante C que possui essas características apresentou os piores resultados no experimento.

Portanto, pode-se concluir que a presença do aditivo EP proporcionou um baixo coeficiente de atrito. O mesmo ocorre através de reações químicas que reagem em altas temperaturas (200 a 1000°C) na região de corte, reagem triboquimicamente com o metal exposto durante o processo mecânico, desenvolvem uma boa aderência e formam uma camada protetora entre a peça e a ferramenta de corte.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

No presente trabalho foram discutidas algumas vantagens da utilização dos tipos de meios lubri-refrigerantes na usinagem de ferro fundido vermicular, principalmente por se tratar de um material ainda novo na indústria automobilística. No sentido de aprofundar este estudo, algumas sugestões de futuros trabalhos que podem contribuir para este amplo campo da usinagem de ferro fundido vermicular são:

- Avaliação sobre a melhor concentração de cada meio lubri-refrigerante para a usinagem de ferro fundido vermicular;
- Aplicação de outro tipos de meios lubri-refrigerantes para a usinagem de ferro fundido vermicular, como por exemplo meios lubri-refrigerantes com base vegetal.
- Estudo dos mecanismos de desgaste presentes nos diversos materiais de ferramentas, na usinagem de ferros fundidos vermiculares.
- Verificação dos efeitos dos meios lubri-refrigerantes sobre as grandezas de saída do processo, para diferentes pressões e vazões de fluido durante a usinagem de ferro fundido vermicular.
- Estudo detalhado de outras faixas de parâmetros de corte na usinagem de ferro fundido vermicular.
- Usinagem com adução de fluido internamente à broca.
- Contribuir ao meio ambiente com reduções dos níveis de uso dos meios lubri-refrigerantes, desde início do seu ciclo, manipulação/instalação até o processo de descarte.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS

- ABELE, E.; DÖRR, J. **Ferramentas de Corte Protegidas contra a Defasagem Tecnológica**. Máquinas e Metais, São Paulo, n.439, p. 38-53, Ago.2002.
- ALVES, S. M. **Adequação Ambiental do Processo de Retificação Através de um Novo Conceito de Fluido de Corte**. 2005. Tese – (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos.
- ANDRADE, C. L. F. **Avaliação do Comportamento de Revestimentos em Brocas de Canal Reto na Furação de Ferro Fundido Vermicular**. 2005. 134f. Dissertação – (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- ARONSON, R. B. **Machine Tool 101: Part 6, Machine Servers**. Manufacturing Engineering. p.47-52, junho 1994.
- ASM. **International Handbook Committee, Metal Handbook**. 6ª edição, Cap. 27, p. 14-20, Maio de 1991.
- ASM. **Speciality handbook: cast irons**. Estados Unidos: ASM International, p. 33-267, 1996.
- BARTZ, W. **Ecological and Environmental Aspects of Cutting Fluids, Lubrication Engineering**, p. 13-16, March 2001
- BEZERRA, A. A. et al. **A lubrificação de mínima quantidade a alta velocidade de corte**. Revista Máquinas e Metais. Setembro 2004.
- BIENKOWSKI, K. **Coolants & Lubricants - The Truth**. Manufacturing Engineering. p.90-96, março 1993.
- BORK, Carlos Alberto. **Otimização de Variáveis de Processo para a Furação do Aço Inoxidável Austenítico DIN 1.4541**. 1995. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BUNSHAH, R. F. **Handbook of hard coatings: depositions technologies, properties and applications**. New Jersey: Noyes Publications, p. 550, 2001.
- BRINKSMEIER, E. **Prediction of tool fracture in drilling**. Annals of the CIRP, 39, p. 97-100. 1990.

- CASTILLO, W. J. G. Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos.** 2005. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2005.
- CATAI, R. E; BIANCHI, E. C. Principais problemas causados pelos fluidos de corte.** Máquinas e Metais. p. 136-138, 2007.
- DAVID, E. Developing In-the-Mold Treatment for CGI.** Technology in Progress. March 2001.
- DAWSON, S.; GUESSER, W.; SCHROEDER, T.; Production Experience With Compacted Graphite Iron Automotive Components.** American foundry society, p. 1-11, 2001.
- DAWSON, S., ET AL. The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron.** Society of Automotive Engineers, 2001.
- DAWSON, S. Propriedades Operacionais do Ferro Fundido Vermicular (CGI): Feedback de Programas de Testes em Andamento.** Publicação Sintercast, Tradução para Português, 1995.
- DAWSON, S., ET AL. The effect of metallurgical Variables on the machinability of compacted graphite iron.** In: Design e Machining Workshop – CGI, 1999.
- DAWSON, S. Compacted Graphite Iron Offers a Viable Design Alternative.** Engineer Casting Solutions, Spring 2000.
- DAWSON, S. Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design.** Based on a paper presented at: Werkstoff und Automobilartrieb (Materials in Powertrain) VDI (Verein Deutscher Ingenieure) Dresden, Germany, October 1999.
- DENG, C. ET AL. Effects of support misalignments in deep-hole drill shafts on hole straightness.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.41, p. 1165-1188, 2001.
- DINIZ, A. E. Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 4 Edição, São Paulo, Editora Artliber, 2003, 179p.
- DROZDA, T. J.; WICK, C. (Ed.) Tool and Manufacturing Engineers Handbook - Machining.** 4ed. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers. v.1, p.4.1-4.53, 1983.
- EL-KHABEERY M. ET AL. Some Observations de Surface Integrity of Deep Drilling Holes.** Elsevier, Cairo, Egypto, v. 142, p.331-349, 1990.
- FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais.** 4ed. Sao Paulo: Edgard Blücher, 1977.

- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo, Editora Edgard Blucher, p. 512, 2003.
- FLEISCHER, J.; SHMIDT, J.; DYCK, M. A **Usinagem sem Fluido de Corte está Praticamente Dominada**. Revista Máquinas e Metais. Outubro 2005.
- FOLTZ, G. **Definitions of Metalworking Fluids**.
- GEORGIU, G. **CGI high speed machine tool solutions**. Lamb Technicon, Warren, USA, 2002.
- GOMES, J., O.; Carvalho, M., V.; Fernandes, D.; F. **Manual de Gerenciamento de Fluidos de Corte**. São José dos Campos, Abril de 2005.
- GUESSER, L. W.; GUEDES, L. C. **Desenvolvimentos Recentes em Ferros Fundidos Aplicados à Indústria Automobilística**. In: IX Simpósio de Engenharia Automotiva, AEA, São Paulo, 1997.
- HAAN D. M. ET AL. **An Experimental Study of Cutting Fluid Effects in Drilling**. Elsevier, Journal of materials processing technology, v. 71, p 304 – 313, 1997.
- HEINICKE, G. in co-operation: HENNIG, H. L. et al. **Tribochemistry**. Carl Hanser Verlag, München, 1984.
- HIEBER, A. F. **Fracture in Compacted Graphite Iron**. AFS Transactions: American Foundrymen Society, Detroit, p 143-154.
- IOWA WASTE REDUCTION CENTER. **Cutting Fluid Management for Small Machining Operations**. A Practical Pollution Prevention Guide (Iowa: University of Northern Iowa, 1996).
- IOWA WASTE REDUCTION CENTER. **Cutting Fluid Management in Small Machine Shop Operations - First Addition**. (Cedar Falls, Iowa: University of Northern Iowa, 1990), p.43.55
- IOWA WASTE REDUCTION CENTER. UNIVERSITY OF NORTHERN IOWA. **Cutting Fluid Management for Small Operations: A Practical Pollution Prevention Guide**. 3^{ed}. dez. 2003.
- JASZEZAK.; JOHN. A. Michigan Technological University, Department of Physics at the A. E. Seama Mineral Museum. **The Graphite Page**. Available at: <http://www.phy.mtu.edu>. Access nov. 11, 2005.
- KIM, D.; RAMULU, M. **Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy steels**. Composite Structures, v.63, p. 101-114, 2004.

KLOCKE, F. und GERSCHWILER, K. **Trockenbearbeitung – Grundlagen, Grenzen, Perspektiven**. VDI Berichte 1240. Auf Dem weg Zur Trocken – Bearbeitung. VDI Verlag. Düsseldorf. p.235, 1996..

KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G. **Dry Cutting**. Annals of the CIRP, v. 46/2, p. 519-526, 1997.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren**. 5 ed. Berlin: Springer, p. 471, 1997.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren, Band 1 : Drehen, Fräsen, Bohren**. 6 ed. Auflage. Berlin : Springer, p.471, 1999..

LAEMPIC, M.; HENKEL, H. **Características do Motor BMW V8 Diesel feito em Ferro Fundido Vermicular**. Fundação e Serviços, São Paulo, p. 42-49, Dezembro 2000.

LEWIS, M. **Five Best for the Machine-tool Industry** American Machinist, p. 79-80, 1997.

LIN, S. C.; TING, C. J. **Tool Wear Monitoring In Drilling Using Force Signals**. Elsevier, Wear, v. 180, p. 53-60, 1994.

LUKAS, J. **What's in the Fluid Often More Important Than the Fluid Itself**. Lubricants World. p.26, maio 1994

MACHADO, R., A.; SILVA, M., B. **Usinagem dos Metais**. 4º. Versão. Uberlândia: Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – UFU, p. 180-190. 1999.

MANG, T. H.; DRESEL, W. **Lubricants and Lubrication**. 2 th ed. Copyright Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007.

MARQUARD, R. e HELFRIED, Sorger e McDONALD, Malcolm. **Crank it up: New materials create new possibilities**. Engine technology international, v. 2, p.58-60. 1998.

MITUTOYO. **Método da Avaliação de Cilindricidade com um Sistema de Medição de Circularidade**. Mitutoyo News – Soluções Completas para Metrologia Dimensional. www.mitutoyo .com.br. 2005

MOCELLIN, F. **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação**. 2002. Dissertação – (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

MONICI, R. D. **Relatório de Estágio Supervisionado**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, CESTEB. p. 33, 1999.

NAKAYAMA, K. ET AL. **Burr Formation Inmetal Cutting**. Annals of the CIRP, V. 36, p. 33 – 37, 1987.

POWELL, W.; LEVERING, P. **CGI: The Little Cast Iron That Could**. Engineered Casting Solutions. Winter 2002.

QUEIROZ, J. L. L., BOEHS, L., SANT'ANNA, F. **“Proposta para Aprimorar o Manejo dos Fluidos de Corte”**. Revista Máquinas e Metais, pág. 250-255, Abril de 1999.

RUNGE, P. R. F.; DUARTE, G. N. **“Lubrificantes nas Indústrias – Produção, Manutenção e Controle” Triboconcept** – Edições Técnicas, p. 71-172, 1989.

SAHM, A.; ABELE, E.; SCHULZ, H. **State of the Art in CGI Machining**. Institute of Production Management, Technology and Machine Tools. University of Technology, Darmstadt, Germany. 1994.

SALES, W. F. **Determinação das Características Refrigerantes e Lubrificantes de Fluidos de Corte**. Tese de Doutorado em Eng. Mecânica apresentada na Universidade Federal de Uberlândia. p. 169, Abril 1999..

SANTOS, A. B. S. ET AL. **Ferro Fundido Vermicular – Obtenção, Microestruturas e Propriedades Mecânicas**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, p. 1-4, 1998,.

SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida – Parte I**. Apostila (traduzida e adaptada por Prof. Eng. Rolf Bertrand Schroeter e Prof. Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingartner do Livro “Fertungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen”, de Prof. Dr. Ing. Dr. h.c. mult. Wilfried König e Prof. Dr. -Ing. Fritz Kloche), p.82 a 236, março 2002.

SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida – Parte II**. Apostila (traduzida e adaptado por Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter e Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner do livro “Fertungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen”, de Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Wilfried König e Prof. Dr.-Ing. Fritz Klocke), janeiro 2002.

SCHULZ, H.; REUTER, U. **Usinagem econômica de ferro fundido com grafita vermicular**. Maquinas e Metais, Abril 2003.

SEAH, K. H. W. ET AL. **The Effect of Applying Coolant on Tool Wear in Metal Machining**. Elsevier, Journal of materials processing technology, v. 48, 1995.

SHOP GUIDE TO REDUCE THE WASTE OF METALWORKING FLUIDS. **A Competitive Advantage Manual for the Metal Fabricating and Machining Industry**. Prepared by: Institute of Advanced Manufacturing Sciences and Waste Reduction and Technology Transfer Foundation. 2000.

SILLIMAN, J. D. **Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application**. Dearborn – Michigan, SME, 2ª ed., p.119-135, 1992.

SINTERCAST. **Compacted Graphite Iron**. Catálogo de produtos. SinterCast S.A, 2001.

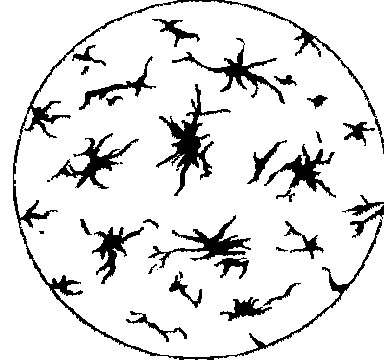
- SLUHAN, C. A. **Selecting the Right Cutting and Grinding Fluids**. Tooling & Production. p. 40–50, maio 1994.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 3ª ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1993.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 4ª ed. Florianópolis: Editora da UFSC, p. 250. 1995.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 5ª ed, Florianópolis: Editora da UFSC, p. 149-249. 2001.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II**. Florianópolis: Editora da UFSC, p. 314. 1992.
- TEETER, F. J. **Coating Takes Place of Coolant**. American Machinist, p. 50, 52, 1999.
- TEIXEIRA, C. R. **Redução e Eliminação de Fluidos de Corte nos Processos de Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida**. Tese de Doutorado em Eng. Mecânica apresentada na Universidade Federal de Santa Catarina. Dezembro 2001.
- TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 4ª ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.
- TUHOLSKI, R. J. **Don't Forget the Cutting Fluid**. Journal of Industrial Technology. p. 2-5, 1993.
- WANG, Z. M. ET AL. **Advances in Precision Machining of Small Deep Holes**. Journal of Materials and Processing Technology, v. 68, p. 257-261, 1997.
- WEBSTER, J. **Selection of Coolant Type and Application Technique in Grinding**. Supergrid, p. 205-218. 1995.
- WERKEMA, M. C. C. **Ferramentas Estatísticas Básicas para o Gerenciamento de Processos**. Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia. v.2, 1995.
- WERTHEIM, R.; LAYYOUS, A.; GOLDBERG, M.; LITTLEFAIR, G. **A Melhor Forma de Usinar Ferro Fundido Nodular Austemperado e Ferro Fundido Vermicular**. Revista Máquinas e Metais. Agosto 2004.
- WICK, C. ET AL. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook: A Reference Book for Manufacturing Engineers, Managers, and Technicians**. 4th ed. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1988.
- WÜRTEMBERG, J. M. **Argumentos Ecológicos para uma Aplicação Maior do Ferro Fundido de Grafita Compactada**. SinterCast, Fevereiro 1994.
- YUHARA, D. A. **Aplicação de Revestimento PVD em Ferramentas de Corte**. Disponível em <www.brasimet.com.br> Acesso em: 13 Abr.2004.

ANEXOS 1

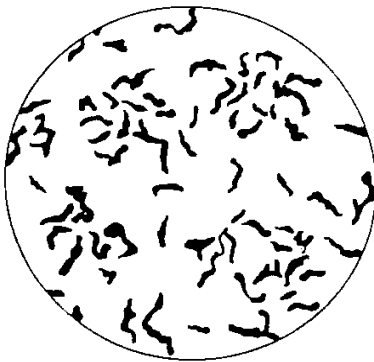
CLASSIFICAÇÃO DA FORMA DAS GRAFITAS



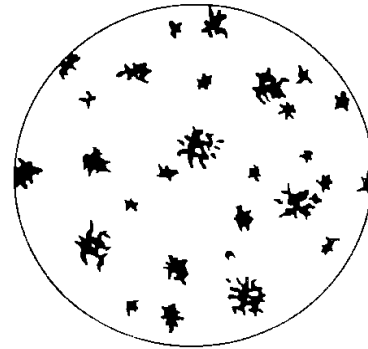
Forma I – Lamelar



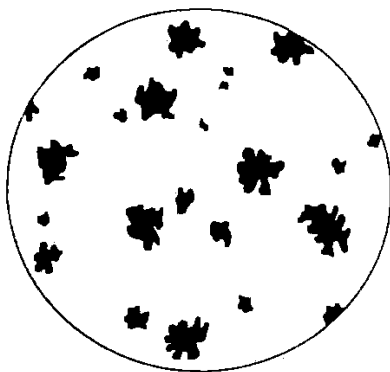
Forma II - Roseta



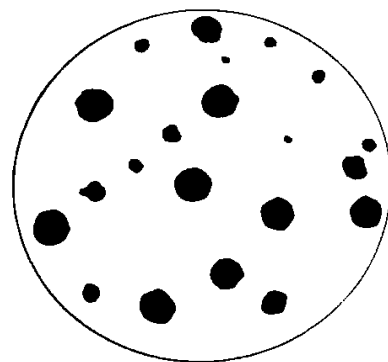
Forma III – Vermicular



Forma IV – Semi-compacta (Recozimento)



Forma V – Compacta (Recozimento)



Forma VI – Nodular (Esferoidal)

ANEXO 2

DIÂMETRO DAS BROCAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS

Ferramenta	Diâmetro nominal da Ferramenta (mm)
1	10,0
2	10,0
3	10,0
4	10,0
5	10,0
6	10,0
7	10,0
8	10,0
9	10,0
10	10,0
11	10,0
12	10,0
13	10,0
14	10,0
15	10,0
16	10,0
17	10,0
18	10,0
19	10,0
20	10,0

Obs.: Com o objetivo de se evitar a influência do diâmetro da ferramenta no experimento, utilizou-se o mesmo lote de brocas de um mesmo fornecedor. Também, todas as ferramentas foram medidas antes do experimento.

ANEXO 3

GRÁFICO BOXPLOT

O gráfico Boxplot é uma representação gráfica da amostragem quanto à distribuição, posição e dispersão, indicados pela Figura 1, ou seja:

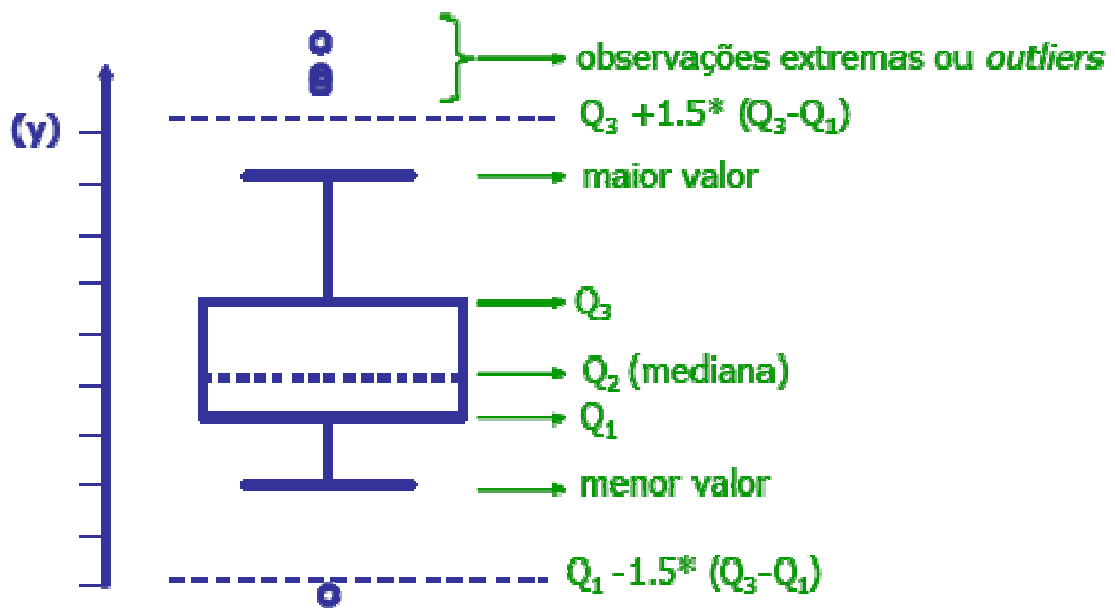


Figura 1 – Gráfico Boxplot

- 1 – Máximo: indica o maior valor da amostragem
- 2 – 3º Quartil: significa 75% dos valores da amostra
- 3 – 2º Quartil: significa 50% dos valores da amostra
- 4 – 1º Quartil: significa 25% dos valores da amostra
- 5 – Mínimo: menor valor da amostragem

ANEXO 4

ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Os resultados de uma pesquisa são válidos estatisticamente através de uma repetição de ensaios, objetivando a obtenção de valores médios do parâmetro em estudo. A grande maioria dos problemas de estatística se faz necessária à amostragem de observações, a partir de uma população de interesse, de forma a se tirar conclusões relativas à população (Montgomery e Runger, 2003).

Decisões de engenharia envolvem, na maioria das vezes, a comparação entre dois ou mais valores para um fator único de interesse, oriundos de ensaios experimentais. A simples comparação de médias de amostras, entretanto, poderá induzir a erros de julgamento e, conseqüentemente, até a tomada de decisão errada.

O método de Análise de Variância (ANOVA) baseia-se em particionar a variância total de uma determinada resposta (variável dependente) em duas partes: a primeira devida ao modelo de regressão e a segunda devida aos resíduos (erros). Se forem efetuadas replicações de determinadas experiências, a ANOVA também permite decompor a variação dos resíduos numa parte relacionada com o erro do modelo e outra parte relacionada com o erro de replicação. A magnitude numérica destas variâncias é comparada formalmente através do teste Fisher (teste F). O teste F é geralmente utilizado para comparar variâncias e decidir se são ou não significativamente diferentes. Este método é utilizado para verificar a significância do modelo de regressão e analisar o ajuste originado pelo modelo. Também é usado para comparar dois modelos diferentes. O caso mais corrente é verificar se existem melhorias no modelo eliminando algumas variáveis independentes (Montgomery e Runger, 2003).

Outra regra de decisão é baseada no valor p (p -value), que deve ser comparado com o nível de significância utilizado no teste:

- Se p -value $< 0,05$, rejeitar H_0 (Aceitar H_A) pois não existe diferença entre as médias;
- Se p -value $\geq 0,05$, não rejeitar H_0 , ou seja, pelo menos uma média é diferente das demais.

Portanto, o nível de significância usado no presente trabalho foi $\alpha = 0,05$, ou seja, intervalo de 95% de confiança. Os resultados estão expostos na Tabela 1, conforme segue abaixo.

Tabela 1 – Valores de *p-value* obtidos nas Análises de Variância

Comparações	Fator											
	Diâmetro		Cilindricidade		Circularidade		Retilidade		Rugosidade Ra		Rugosidade Rz	
	α	p-value	α	p-value	α	p-value	α	p-value	α	p-value	α	p-value
Meios lubri-refrigerantes A-B-C e Seco	0,05	0,124	0,05	0,076	0,05	0,077	0,05	0,435	0,05	0,467	0,05	0,063

A partir dos valores obtidos e apresentados na Tabela 1, conclui-se que resultados obtidos nas Análises de Variância conforme são maiores que 0,05. Dessa forma, poder-se-ia afirmar que não existem diferenças entre as médias dos meios lubri-refrigerantes e a condição a seco para os fatores: diâmetro, cilindridade, circularidade, retitude, rugosidade R_a e rugosidade R_z .

Porém, não é possível definir tais diferenças entre as condições utilizadas no experimento em função do pequeno número de pontos avaliados nas ferramentas e nos corpos de provas, conforme demonstrado no Capítulo 5. Apenas podem ser relatadas as tendências nos fatores aqui estudados.