

Universidade Estadual Paulista - UNESP

**Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia
de Materiais**

Ulysses de Barros Fernandes

**“ANÁLISE DE MÉTODOS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO
APLICADOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO
CILÍNDRICA INTERNA DE Mergulho em Aços
ENDURECIDOS”**

**Bauru
2007**

Ulysses de Barros Fernandes

**“ANÁLISE DE MÉTODOS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO
APLICADOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO
CILÍNDRICA INTERNA DE MERGULHO EM AÇOS
ENDURECIDOS”**

Tese apresentada ao programa de
Pós-graduação em Ciência e Tecnologia
de Materiais da Universidade Estadual
Paulista – Curso de Doutorado, como
requisito à obtenção do título de Doutor em
Ciência e Tecnologia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi
Co-Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar

Bauru
2007

DEDICATÓRIA

Aos meus Pais Telêmaco Fernandes Filho e Terezinha Ap. de Barros Fernandes , a minha esposa Silvia Helena Hatum Fernandes e aos meus filhos Mariana e Henrique .

AGRADECIMENTOS

Expresso os mais sinceros agradecimentos:

Ao meu Orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pelo constante apoio cedido em todas as etapas do projeto, pela valiosa amizade sincera, incentivo prestado e total confiança cedida a minha pessoa.

Ao Co-Orientador Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, pelas excelentes trocas de informações e apoios cedidos durante a realização do Projeto, incentivo e grande amizade desenvolvida.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP, Campus de Bauru e aos Laboratórios de Pesquisa pertencentes à Instituição.

Ao Eng^o Mecânico José Augusto Camargo Alves pelo total empenho e dedicação prestados para o bom desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos Uilson Kruger da Oficina Mecânica e Hamilton José de Mello do Laboratório de Materiais e também aos técnicos Rodrigo Leandro Salvador e Cristiano Angélico pelo apoio técnico fornecido.

A minha esposa Silvia Helena e aos meus filhos Mariana e Henrique por estarem sempre presentes ao meu lado e me apoiando intensamente durante a realização deste trabalho.

Agradeço ainda, ao Doutor Carlos Elias da Silva Júnior, ao Mestre Humberto Fujita que de maneira direta, devido ao grande conhecimento que possuem, muito contribuíram para a execução deste trabalho.

Ao Sr^o Yukio Suzuki da empresa NIKKON por ter gentilmente cedido os rebolos utilizados nesta pesquisa.

Ao Eng^o Marcos Lázaro O. Azambuja da empresa Rolamentos FAG por ceder anéis de rolamentos para serem utilizados como corpo de provas na primeira etapa deste trabalho.

Aos docentes do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP de Bauru, que contribuíram para a realização desta pesquisa com sugestões ou conselhos, notoriamente, aos Professores Doutores Carlos Alberto Soufen, Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez, Luiz Daré Neto, Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves.

A funcionária da pós-graduação Djanira Amaral pela atenção e cortesia dispensada.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo FAPESP pelo auxílio à pesquisa, que teve importância fundamental para a realização deste trabalho.

Ao Instituto Fábrica do Milênio IFM, que contribuiu para o conhecimento científico e tecnológico de todos aqueles que direta ou indiretamente estiveram envolvidos na execução deste trabalho.

E principalmente a Deus pelo entusiasmo e saúde mantidos durante todas às etapas desse projeto.

RESUMO

A operação de retificação cilíndrica interna de precisão tem sido empregada na fabricação de componentes de responsabilidade na indústria metal-mecânica em geral. As modernas retificadoras CNC aprimoraram este processo no que diz respeito ao posicionamento e à rigidez do sistema máquina-peça-ferramenta, possibilitando a obtenção de peças de elevada precisão com baixos valores de tolerâncias dimensionais. Todavia, tem-se observado nos últimos anos uma crescente conscientização quanto à toxicidade dos fluidos de corte empregados na lubrificação e refrigeração da peça. Paralelamente, criou-se nos últimos anos uma rígida legislação, visando evitar uma depredação desenfreada do meio ambiente. Diante de tal conjuntura, as indústrias iniciaram uma busca a métodos alternativos de lubri-refrigeração que empregassem menores quantidades. Dentre todas as técnicas existentes à de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) vem ganhando cada vez mais destaque. Tal técnica pode ser entendida como um elo de ligação entre os métodos de lubri-refrigeração convencional e a usinagem a seco. Pretende-se ainda avaliar o desempenho de um novo bocal de aspersão de fluido de corte, baseando-se no modelo desenvolvido por Webster , adequado a operação de retificação cilíndrica interna. Logo, tem-se neste trabalho, o intuito de associar estas novas tendências por meio do estudo do comportamento da operação de retificação cilíndrica interna de mergulho a alta velocidade no processo de acabamento de um aço endurecido, utilizando-se a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL), o modelo otimizado e ainda o modelo convencional. A análise dos dados que servirão para a avaliação dos métodos de lubri-refrigeração empregados será feita por meio dos valores de rugosidade , desvio de circularidade , micro-estrutura e micro-dureza . Espera-se, com este trabalho, contribuir para o aprimoramento de uma tecnologia ecologicamente correta, proporcionando às indústrias menores custos , possibilitando aquisição de menores quantidades de fluido de corte e também com seu posterior descarte.

Palavras-Chave: retificação cilíndrica interna, mínima quantidade de lubrificação (MQL), bocal de aspersão, superabrasivos de CBN, fluidos de corte.

ABSTRACT

The operation of intern cylindrical grinding with precision is been used to manufacture components of responsibility in metal-mechanic industry in general. The moderns grinders CNC improved this process when we are talking about the position and roughness of system machine- workpiece-tool, making possible to obtain pieces with high precision and low dimensional tolerances. However, is been observed an increase of awareness about the cutting fluids toxicity used on lubrication and cooling pieces. In front of this situation, the industries began to seek alternative lubrication and cooling methods using less quantities of it. Among al techniques, the Minimum Quantity Lubrication (MQL) has been gaining increasing stature. This technique can be understood as a combination of conventional lubrication and cooling methods and dry machining. It is intended to analyze the performance an a new spray nozzle of cutting fluide, based on a model developed by Webster, used on an intern cylindrical grinding operation. Right away, there is on this study the intention to associate these new trends through a study of a conduct to the intern cylindrical grinding operation with high speed on a process of finishing a hardened steel, applying the Minimum Quantity Lubrication (MQL) technique, the optimistic model and even a conventional model. The analyze of datas which will be used as an evaluation to the lubrication and cooling methods used will be done throughout roughness values, roundness detour, micro-structure, and micro-hardness. The expectation with this study is contribute to improve a technology protecting the environment, providing fewer costs to industries, permitting acquisition of less quantities of cutting fluid and also your discard.

KEY-WORDS: Intern cylindrical grinding, Minimum Quantity of Lubrication (MQL), spray nozzle, CBN superabrasives, cutting fluids.

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS.....	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	16
1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos.....	20
1.2 Estruturação do trabalho.....	21
1.3 Justificativas para a realização desta pesquisa.....	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 O Processo de Retificação Cilíndrica Interna de Mergulho: Fenomenologia e Conceitos.....	24
2.1.1 A origem da usinagem com abrasivos.....	25
2.1.2 Caracterização do processo de retificação.....	26
2.1.3 O Ciclo de Retificação.....	27
2.1.4 Principais Parâmetros Associados ao Processo de Retificação	28
2.1.4.1 Comprimento de contato (l_c).....	29
2.1.4.2 Diâmetro equivalente (d_e).....	29
2.1.4.3 Espessura de corte equivalente (h_{eq}).....	30
2.1.4.4 Parâmetros de Corte.....	30
2.1.4.4.1 Profundidade de Corte (a).....	30
2.1.4.4.2 Velocidade de Mergulho (V_f).....	31
2.1.4.4.3 Velocidade de Corte (V_s).....	31
2.1.4.4.4 Velocidade da Peça (V_w).....	32
2.1.5 Mecanismo de formação de cavaco	33
2.2 Características e propriedades dos rebolos.....	35
2.2.1 Introdução	35
2.2.2 Descrição e caracterização dos componentes do rebolo.....	36
2.2.2.1 Materiais abrasivos.....	36
2.2.2.2 Tamanho do grão abrasivo.....	39
2.2.2.3 Dureza do rebolo	39
2.2.2.4 Estrutura do rebolo	40

2.2.2.5 Materiais aglomerantes	41
2.2.3 Dressagem e topografia de rebolos	44
2.3 Fluidos de corte	49
2.3.1 A importância da utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem	49
2.3.2 Classificação dos fluidos de corte	51
2.3.2.1 Óleos de Corte	52
2.3.2.2 Fluidos solúveis em água	53
2.3.2.2.1 As emulsões	53
2.3.2.2.2 Fluidos sintéticos	54
2.3.2.2.3 Fluidos semi-sintéticos	55
2.3.2.3 Gases e lubrificantes sólidos	56
2.3.3 Funções dos fluidos de corte no processo de retificação	57
2.3.4 Aspectos que afetam a estabilidade dos fluidos de corte aplicados no processo de retificação	58
2.3.4.1 Acidez ou alcalinidade	58
2.3.4.2 Concentração	58
2.3.4.3 Qualidade da água	59
2.3.5 Controle microbiológico de emulsões	59
2.3.6 Manutenção dos fluidos de corte	61
2.4 A importância da aplicação de fluido de corte no processo de retificação	63
2.4.1 Posicionamento do bocal	64
2.4.2 Utilização de bicos otimizados arredondados	65
2.4.3 Utilização de bicos especiais com uma envolvente ao redor do rebolo	67
2.4.4 Utilização de bicos ejetores com elementos condutores	68
2.4.5 Utilização de sapatas refrigerantes e defletores	69
2.5 A técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL)	69
2.5.1 Fatores motivantes para utilização da MQL	70
2.5.2 Definições da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação	70
2.5.3 Análise do desempenho da técnica de MQL na operação de retificação cilíndrica interna	72
2.5.4 Classificação e Projeto de Sistemas de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL)	74
2.6 Variáveis de saída envolvidas no processo	75
2.6.1 Emissão Acústica	77

	10
2.6.2 Rugosidade das peças retificadas	79
2.6.3 Desgaste do rebolo e relação G.....	82
2.6.4 Desvios de Circularidade	83
2.6.5 Análise da microestrutura - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	85
2.6.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura e Microscopia Óptica.....	86
2.6.5.3 Aspectos Básicos da Construção e Funcionamento do MEV	87
2.6.5.3.1 Geração e focagem do feixe	87
2.6.5.3.2 Canhão de elétrons	87
2.6.5.3.3 Lentes magnéticas e sistema de varredura	89
2.6.5.3.4 Detectores	90
2.6.5.3.5 Tubo de raios catódicos.....	91
2.6.5.4 - Interações Entre o Feixe de Elétrons e a Amostra	91
2.6.5.4.1 Volume de interação	92
2.6.5.4.2 Elétrons secundários.....	92
2.6.5.4.3 Elétrons retroespalhados.....	93
2.6.5.4.4 Raios-X.....	94
2.6.5.5 Preparação de Amostras para MEV	95
2.6.5.5.1 Tamanho da amostra	95
2.6.5.5.2 Limpeza da amostra	95
2.6.5.5.3 Montagem das amostras	96
2.6.5.5.4 Amostras embutidas	96
2.6.5.5.5 Amostras não embutidas	97
2.6.6 Microdureza	98
3. MATERIAIS E MÉTODOS	100
3.1 Procedimento Experimental.....	101
3.1.1 Corpos de prova e suportes de fixação	101
3.1.2 Seleção da ferramenta.....	106
3.1.3 O Cabeçote retificador.....	108
3.1.4 Medição da rotação do rebolo.....	109
3.1.5 Medição do Sinal de Emissão Acústica.....	111
3.1.6 Sentido de avanço do rebolo	115
3.1.7 A Técnica de MQL.....	116
3.1.8 Preparação dos fluidos de corte	119
3.1.9 O método Convencional de lubri-refrigeração	121
3.1.10 O Método Otimizado de Lubri-refrigeração	123
3.2 Classificação dos ensaios.....	124
3.3 Execução dos ensaios definitivos.....	125
3.3.1 A operação de dressagem e avivamento.....	125

3.3.2 Procedimentos padrões adotados antes de cada ensaio	126
3.3.3 Procedimentos executados durante a realização dos ensaios.....	126
3.3.4 Parâmetros de Usinagem	128
3.3.5 Procedimentos adotados para a medição das variáveis de saída.....	128
3.3.5.1 Medição do desgaste diametral do rebolo.....	128
3.3.5.2 Medidas de Rugosidade	130
3.3.5.3 Medição dos desvios de Circularidade	131
3.3.5.4 Preparação das amostras para análise.....	133
3.3.5.5 Microdureza	136
3.3.5.6 Realização da MEV	136
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	137
4.1 Rugosidade	137
4.1.1 Valores de rugosidade da primeira etapa.....	137
4.1.2 Valores de rugosidade da segunda etapa	140
4.2 Desvios de Circularidade.....	141
4.3 Microdureza	143
4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	147
5. CONCLUSÕES.....	152
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	154
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Caracterização da operação de retificação cilíndrica interna e principais parâmetros envolvidos (Chen et al., 2002).	26
Figura 2.2 – Esquemática gráfica de um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho (Hassui et al., 1998, adaptada).	27
Figura 2.3 – Três regiões de micro-fenômenos envolvidos no processo de formação de cavacos na retificação (KÖNIG, 1980 apud HASSUI, 2002).	35
Figura 2.4 – Esquemática da operação de dressagem com dressador de ponta única (HASSUI & DINIZ, 2003 adaptada por CATAI, 2004).	46
Figura 2.5 – Quantidade de fluidos de corte consumida na Alemanha em 1997, comparada ao consumo de outros óleos (NOSVASKI & DÖRR, 1999 adaptada).	50
Figura 2.6 – Custos médios de fabricação com detalhamento dos custos associados à refrigeração (NOSVASKI & DÖRR, 1999 adaptada por CATAI, 2004).	50
Figura 2.7 – Classificação dos fluidos solúveis em água (EL BARADIE, 1996, adaptado).	53
Figura 2.8 – Esquemática da ação de emulgadores em uma emulsão (Runge & Duarte, 1990).	54
Figura 2.9 – Esquemática do processo de disposição de fluidos usados (SOKOVIC & MIJANOVIC, 2001).	62
Figura 2.10 – Fatores que afetam a aplicação do fluido (CAMPBELL, 1995 - adaptada).	63
Figura 2.11 - Rugosidade média do corpo de prova em função do posicionamento do bocal (EBBRELL et al., 1999).	65
Figura 2.12 – Bocal tradicional (WEBSTER et al., 1995).	66
Figura 2.13 – Bico especial arredondado (WEBSTER et al., 1995).	66
Figura 2.14 – Bico especial, com uma envolvente ao redor do rebolo (SILLIMAN, 1992).	68
Figura 2.15 – Bicos ejetores (tipo sapata) com elementos condutores (BRINKSMEIER et al., 2001).	68
Figura 2.16 – Modelo esquemático de um Sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação por pressão (HEISEL et al., 1998).	75
Figura 2.17 – Desvio de Circularidade observado em uma peça retificada (CHO & TU, 2001).	84
Figura 3.1 – Retificadora cilíndrica SULMECÂNICA com CNC (Comando Numérico Computadorizado).	100
Figura 3.2 – Representação em corte do corpo de prova inicialmente utilizado nos ensaios.	101
Figura 3.3 – Suporte de fixação do corpo de prova.	102
Figura 3.4 – Vistas frontal e lateral do corpo de prova.	103
Figura 3.5 – Posicionamento do bocal de MQL próximo à região de corte.	103
Figura 3.6 – Suporte fixador do corpo de prova.	104
Figura 3.7 – Corpo de prova definitivo.	105
Figura 3.8 – Fixação do rebolo no cabeçote retificador.	106
Figura 3.9 – Foto da haste rompida devido aos intensos esforços de flexão.	107

Figura 3.10 – Ferramenta abrasiva de CBN utilizada para a execução dos ensaios.....	108
Figura 3.11 – Unidade de filtragem e lubrificação do ar comprimido.....	109
Figura 3.12 – Tacômetro óptico e rebolo com a fita reflexiva utilizados para a medição da rotação obtida no cabeçote retificador.	110
Figura 3.13 – Medição da rotação do cabeçote retificador.	111
Figura 3.14 – Sensor de emissão acústica fluídico.	112
Figura 3.15 – Vista da face inferior do sensor de emissão acústica fluídico.	113
Figura 3.16 - Unidade de tratamento do sinal de emissão acústica.	114
Figura 3.17 – Sensor de emissão acústica acoplado ao suporte construído para ser fixado ao cabeçote retificador.....	114
Figura 3.18 – Sensor de emissão acústica fixado sobre o corpo do cabeçote retificador.	115
Figura 3.20 – Componentes da unidade de controle do equipamento de MQL.	117
Figura 3.21 – Projeto do bocal de MQL.....	118
Figura 3.22 – Bocal empregado na técnica de MQL.	118
Figura 3.23 – Medidor de vazão de ar e reguladores de pressão utilizado na experimentação com MQL e na alimentação do cabeçote retificador.	119
Figura 3.24 – Reservatório de fluido de corte para ser utilizado no método convencional de lubri-refrigeração.	120
Figura 3.25 – Equipamentos utilizados para o monitoramento do fluido de corte:.....	121
(a) peagâmetro (b) refratômetro.....	121
Figura 3.26 – Mangueiras utilizadas no método convencional de lubri-refrigeração...	122
Figura 3.27 – Operação de retificação interna empregando-se a técnica convencional de lubri-refrigeração.....	122
Figura 3.28 – Bocal otimizado elaborado para a operação de retificação interna.	123
Figura 3.29 – Medidor de vazão, em l/min, para o controle do fluxo de fluido de corte.	124
Figura 3.30 – Medição do desgaste diametral do rebolo.....	129
Figura 3.31 – Rugosímetro Taylor Hobson®, modelo Surtronic 3+, montado na retificadora, executando medições a cada 20 ciclos (primeira etapa).....	130
Figura 3.32 – Medição de rugosidade após a conclusão do ensaio (segunda etapa). ...	131
Figura 3.33 – Aparelho TALYROND 31 C, Taylor Robson utilizado para medição dos desvios de circularidade.....	132
Figura 3.34 – Medição dos desvios de circularidade da peça retificada.	133
Figura 4.1– Valores de rugosidade obtidos a cada 20 ciclos de retificação com o emprego da técnica de MQL (vazão de ar = 30m ³ /h; vazão de óleo = 48ml/h). ..	138
Figura 4.2– Valores de rugosidade obtidos a cada 20 ciclos de retificação com o emprego da técnica de MQL (vazão de ar = 30m ³ /h; vazão de óleo = 60ml/h). ..	138
Figura 4.3– Valores de rugosidade obtidos a cada 20 ciclos de retificação com o emprego da técnica de MQL (vazão de ar = 30m ³ /h; vazão de óleo = 80ml/h). ..	139
Figura 4.4 – Valores de rugosidade em função do método de lubri-refrigeração e da taxa de avanço empregados.....	140
Figura 4.5 – Desvios de circularidade obtidos com a técnica de MQL.	141
Figura 4.6– Desvios de circularidade em função do método de lubri-refrigeração e da taxa de avanço empregados.	142
Figura 4.7 – Valores médios de microdureza HK em função do método lubri-refrigerante empregado, utilizando-se taxa de avanço de 2,0 mm/min.....	143
Figura 4.8 – Valores de microdureza HK em função da profundidade de medição, utilizando-se taxa de avanço de 2,0 mm/min.....	144

Figura 4.9 – Valores médios de microdureza HK em função do método lubri- refrigerante empregado, utilizando-se taxa de avanço de 1,5 mm/min.....	144
Figura 4.10– Valores de microdureza HK em função da profundidade de medição, utilizando-se taxa de avanço de 1,5 mm/min.....	145
Figura 4.11 – Valores de microdureza HK em função da profundidade de medição, utilizando-se taxa de avanço de 1,0 mm/min.....	145
Figura 4.12 – Valores de microdureza HK em função da profundidade de medição, utilizando-se taxa de avanço de 1,0 mm/min.....	146
Figura 4.13 – MEV do corpo de prova submetido ao método otimizado de lubri- refrigeração e taxa de avanço de 2,0 mm/min (ampliação de 1000 vezes).	148
Figura 4.14 – MEV do corpo de prova submetido ao método convencional de lubri- refrigeração e taxa de avanço de 2,0 mm/min (ampliação de 1000 vezes).	149
Figura 4.15 – MEV do corpo de prova submetido ao método otimizado de lubri- refrigeração e taxa de avanço de 2,0 mm/min (ampliação de 5000 vezes).	149
Figura 4.16 – MEV do corpo de prova submetido ao método convencional de lubri- refrigeração e taxa de avanço de 1,5 mm/min (ampliação de 1000 vezes).	150
Figura 4.17 – MEV do corpo de prova tratado termicamente e não submetido à operação de retificação (ampliação de 1000 vezes).....	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Caracterização dos fluidos de corte	56
Tabela 2.2 – Comparação dos parâmetros entre MO e MEV	86
Tabela 3.1 – Composição química do aço ABNT 4340 (%)	105
Tabela 3.2 – Classificação e cronologia dos ensaios	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a – penetração do rebolo na peça	[mm]
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas	[- -]
a_d – profundidade de dressagem	[μm]
Al₂O₃ - óxido de alumínio	[- -]
Asd – área de dressagem	[mm ²]
b – largura de retificação	[mm]
b_d – largura de atuação do dressador	[mm]
b_{dr} – largura real de atuação do dressador	[mm]
CBN – nitreto cúbico de boro	[- -]
CNC - comando numérico computadorizado	[- -]
CRT – tubo de raios catódicos	[- -]
d_s – diâmetro do rebolo	[mm]
d_i - diâmetro interno da peça	[mm]
d_e – diâmetro externo da peça	[mm]
ES – elétrons secundários	[- -]
ER – elétrons retroespalhados	[- -]
F_t – força tangencial de corte	[N]
F_n – esforços normais	[N]
G – relação de volume	[- -]
h_{eq} – espessura equivalente de corte	[mm]
IT – tolerância dimensional e geométrica	[- -]
l_c – comprimento de contato	[mm]
L – comprimento de medição	[μm]
MEV – microscopia eletrônica de varredura	[- -]
MO – microscopia óptica	[- -]
MQL – Mínima Quantidade de Lubrificação	[- -]
n_s – rotação do rebolo	[RPM]
n_w – rotação da peça	[RPM]
P – potência de corte	[Kw]

Q_{fluido} – vazão do fluido de corte	[ml/h]
Q_w – taxa de remoção do material	[mm ³ /min]
R_a – rugosidade média	[μm]
RMS – Valor quadrático médio	[KHz]
r_p – raio da ponta do dressador	[mm]
RX – raios X	[- -]
s_d - avanço por volta do dressador	[mm/volta]
τ_r – tensão residual normal	[MPa]
t_s – tempo de centelhamento	[s]
T – torque	[N.m]
U_b – grau de recobrimento	[- -]
Uc – energia específica total de retificação	[J/mm ³]
u_{cl} – energia de formação de cavaco	[J/mm ³]
u_{pl} – energia utilizada na deformação do material	[J/mm ³]
u_{sl} – energia de deslizamento do grão na peça	[J/mm ³]
y – altura do pico	[μm]
y_{cl} – variável da linha da centro	[μm]
W_t – ondulação teórica	[mm]
v_{ar} – velocidade do ar comprimido	[m/s]
v_f – velocidade de avanço	[mm/min]
v_s – velocidade de corte do rebolo	[m/s]
v_w – velocidade da peça	[m/min]
Z_w – volume de material removido	[mm ³]
Z_s – volume de rebolo gasto	[mm ³]

1. INTRODUÇÃO

Retificação é a designação mais comum com que se define o processo de usinagem que utiliza partículas abrasivas para promover a remoção de material. Sabe-se que a retificação é mais velha entre todos os processos de fabricação existentes, pois os homens pré-históricos afiavam suas ferramentas pressionando-as contra pedras arenosas. A retificação é tradicionalmente considerada como uma operação final de usinagem, capaz de proporcionar valores reduzidos de rugosidade (R_a de 0,2 a 1,6 μ m) dentro de apertados índices de tolerâncias (tolerâncias dimensionais entre IT4 e IT6 e geométricas compatíveis). Atualmente, o processo de retificação é o mais empregado dentre todos os processos de fabricação existentes, correspondendo à cerca de 25% do total de operações de usinagem efetuadas nos países desenvolvidos (MALKIN, 1989; CHANG & SZERI, 1998; NATHAN et al., 1999; DINIZ et al., 2000; LEE & KIM, 2001).

No processo de retificação as interações entre os grãos abrasivos da ferramenta abrasiva e a peça são bastante intensas, fazendo com que a alta energia requerida por unidade de volume de material removido seja, quase que integralmente, transformada em calor, o qual se concentra na região de corte. As elevadas temperaturas geradas podem produzir vários tipos de danos térmicos à peça, como: queima superficial, mudanças microestruturais envolvendo mudança de fase, aparecimento de tensões residuais, sendo todos estes fatores que proporcionam uma deterioração da qualidade final do componente produzido (MALKIN, 1989; LIAO et al., 2000).

O aprimoramento do processo de retificação visando controlar as condições térmicas durante a operação faz com que cada vez mais atenção seja dispensada a seleção adequada da ferramenta, em função do tipo de material a ser retificado e também ao método de lubri-refrigeração e fluidos de corte empregados. Os fluidos de corte têm a função de reduzir o atrito e o calor, sendo responsável também por expelir o material removido (cavacos) da zona de corte. Adotando-se tais procedimentos consegue-se trabalhar com altas taxas de remoção de material, produzindo peças de elevada qualidade dimensional e geométrica, proporcionando a ferramenta abrasiva uma longa vida útil (SALES et al., 1999; WEBSTER et al., 1995).

No entanto, a utilização de óleos lubrificantes no processo deve ser ponderada, pois os observando sob a ótica ambiental constata-se que estes convertem-se, no fim da

sua vida útil, segundo Schmidt & Dyck (2003) em um resíduo de difícil descarte. Antigamente tal resíduo tinha como destino final rios e lagos, resultando em imensos danos ecológicos, pois segundo Burmeister (2002), apenas um litro de óleo usado na composição do fluido de corte, quando descartado erroneamente, pode contaminar cerca de um milhão de litros de água potável. Visando impedir a continuidade de tais atos predatórios, implementou-se nas últimas décadas, rígidas Leis Ambientais e certificações, tais como a ISO 14001, que indica um comprometimento da empresa no que diz respeito à preservação ambiental.

Desta forma, englobando os custos de aquisição do óleo lubrificante, dos equipamentos necessários à sua aplicação e ainda os gastos relacionados ao descarte ambientalmente correto deste produto, pode-se atingir 40% do custo total do processo (SCHMIDT & DYCK, 2003). Tal fato fez com que indústrias, centros de pesquisas e universidades se unissem na tentativa de viabilizar processos alternativos de produção, criando novas tecnologias capazes de minimizarem ou até mesmo evitarem a produção de resíduos agressivos ao meio ambiente (SILVA et al., 2004).

É neste contexto que pesquisadores concentraram esforços em direção a usinagem a seco e desenvolveram a tecnologia da Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL), a qual consiste na combinação de um fluxo de ar comprimido e uma pequena quantidade de óleo lubrificante. Esta técnica apresenta-se como uma alternativa promissora frente aos outros métodos de lubri-refrigeração, pelo fato de que a pequena quantidade de óleo empregada desempenha a função de lubrificação, reduzindo a potência de retificação e o desgaste do rebolo, melhorando, desta forma, a qualidade superficial da peça. Já o fluxo de ar comprimido é responsável retirada de calor do rebolo e/ou da peça, mantendo-as em temperaturas adequadas de trabalho (HAFENBRAEDL & MALKIN, 2001 e HEISEL et al., 1998).

Por outro lado, Webster et al. (1995) ressaltam que a aplicação de fluido é de fundamental importância no processo de retificação, devido ao intenso atrito existente entre peça e ferramenta elevando intensamente a temperatura. Não obstante, o jato de fluido é importante por promover a remoção dos cavacos formados e dos abrasivos perdidos durante o processo. Os autores acima analisaram os modelos convencionais de lubri-refrigeração e verificaram que a extinção de dobras nos bocais poderia facilitar o fluxo do fluido de corte. Assim, optaram pelo desenvolvimento de um bocal capaz de proporcionar uma velocidade de saída acima de 45 m/s, maximizando o efeito de lubri-

refrigeração na região de corte. Além disso, observaram que a aplicação dependia fundamentalmente do posicionamento do bocal, velocidade do jato e distância do local de contato entre peça e ferramenta. Campbell (1995) atenta ainda para os efeitos do posicionamento angular do bocal, pois segundo ele, um direcionamento inadequado do fluxo pode permitir o surgimento de correntes de ar que prejudicam a trajetória do fluido de corte até a região de corte.

Observa-se também que o bom desempenho do processo de retificação não é alcançado somente com o desenvolvimento tecnológico de novos modelos de lubri-refrigeração. No que diz respeito à ferramenta abrasiva, observou-se nas últimas décadas o desenvolvimento de um novo tipo de grão abrasivo policristalino, denominado CBN, o qual deriva da transformação direta do Nitreto Cúbico de Boro produzido por meio de processos químicos. A utilização de rebolos de CBN implica em um aumento da resistência à fadiga das peças usinadas, aumento da produtividade e redução do consumo energético. Além disso, a ferramenta abrasiva de CBN possui um excelente desempenho na retificação de aços endurecidos (CHEN et al., 2000).

Este trabalho visa avaliar o desempenho da técnica de MQL e do modelo otimizado de lubri-refrigeração no processo de retificação cilíndrica interna de mergulho empregando um rebolo superabrasivo de CBN. O diferencial deste projeto se fundamenta na pequena quantidade de trabalhos executados no Brasil e no mundo, envolvendo a associação de tais tecnologias. Deste modo, será possível estabelecer novos parâmetros, otimizando o processo de retificação, além de torná-lo uma alternativa ambientalmente correta de produção.

1.1 Objetivos

Tem-se como objetivo neste trabalho verificar a compatibilidade e o desempenho do uso da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) e do método otimizado de lubri-refrigeração, quando comparados ao modelo convencional de lubri-refrigeração, no processo de retificação interna utilizando um rebolo superabrasivo de CBN. Objetiva-se ainda fazer uma otimização global do processo de retificação no que diz respeito ao desempenho, aplicabilidade e monitoramento.

A avaliação do desempenho dos métodos de lubri-refrigeração, das vazões e velocidades adotadas no processo será feita por meio da análise do comportamento dos valores de rugosidade e desvios de circularidade.

1.2 Estruturação do trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em capítulos, cujo conteúdo é descrito abaixo:

No capítulo 1 apresenta-se uma introdução geral sobre o processo de retificação e a problemática envolvendo a utilização dos fluidos de corte. Apresenta-se ainda os principais objetivos deste trabalho e as justificativas para a realização desta pesquisa científica.

O capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica, visando apresentar conceitos fundamentais sobre os principais focos de estudo do trabalho, sendo os mais importantes deles o processo de retificação interna de mergulho, a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) e o bocal empregado na otimização da aplicação do fluido.

No capítulo 3 descreve-se a metodologia empregada neste trabalho bem como os materiais e equipamentos utilizados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões referentes a este trabalho científico.

O capítulo 5 apresenta-se as conclusões obtidas mediante a análise dos resultados. Por fim, na seqüência estão dispostas às referências bibliográficas que foram utilizadas para a elaboração deste trabalho.

1.3 Justificativas para a realização desta pesquisa

A retificação cilíndrica interna de mergulho é um processo de fabricação bastante limitado devido à impossibilidade de se obter a rigidez necessária desejada do sistema peça-ferramenta, dificultando desta forma, a remoção de material, o que, conseqüentemente, converte em tempos maiores de usinagem. No entanto, este trabalho tem o intuito de estabelecer alguns parâmetros visando otimizar o processo, tornando-o mais ágil e qualificado. A otimização abrangerá ainda, o modo de refrigeração do sistema, por meio da utilização da técnica de MQL e do modelo otimizado, baseado no bocal desenvolvido por Webster (1995), ambos comparados ao modelo convencional de lubri-refrigeração.

Embora o método de refrigeração convencional seja aparentemente eficiente quando aplicado ao processo de retificação, a grande quantidade de fluido de corte utilizada acarreta em um custo muito elevado para as indústrias, englobando desde a proteção do trabalhador até os rigorosos cuidados necessários com o descarte do fluido, aumentando, deste modo, os custos de produção. Como as empresas se esforçam para reduzir estes gastos, estas passarão a preferir novas técnicas, tal como a MQL, que consiste em uma metodologia otimizada de aplicação de fluido através da qual uma quantidade mínima de óleo é misturada a um fluxo de ar comprimido, formando uma névoa que é aspergida na interface de contato rebolo/peça. Poderão ainda optar pelo modelo otimizado, na qual um jato direcionado de fluido de corte a alta pressão é capaz de promover adequadamente a lubrificação da peça e remover grande parcela do calor gerado durante o corte.

Este trabalho tem o intuito de atingir todas as indústrias que utilizam fluidos de corte e estão insatisfeitas com a onerosidade do processo de manipulação deste, viabilizando um método alternativo capaz de até mesmo superar o processo convencional no que diz respeito à qualidade da peça final. Executado o trabalho, serão esclarecidos quais os parâmetros de entrada que comprovem a eficiência do método; podendo, então, tais parâmetros serem aproveitados pelas indústrias.

Além disso, por meio deste trabalho foi possível firmar uma parceria entre a universidade e a empresa fabricante de rebolos, sendo este um caminho bastante proveitoso para ambas instituições no que diz respeito ao aprimoramento do processo de retificação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão abordará os principais temas relevantes neste trabalho, envolvendo os tópicos relacionados à retificação cilíndrica interna de mergulho, a Mínima Quantidade de Lubrificação, ao bocal e a técnica otimizada de aplicação de fluido de corte, apresentando modelos que permitam atingir uma condição satisfatória de trabalho, tanto no que diz respeito à preservação ecológica e dos trabalhadores quanto na qualidade final do produto produzido. Nesta revisão foram consultados artigos publicados nos melhores periódicos nacionais e internacionais, além de livros, teses, dissertações e catálogos.

2.1 O Processo de Retificação Cilíndrica Interna de Mergulho: Fenomenologia e Conceitos

O processo de retificação tem como objetivo produzir componentes de precisão com excelente qualidade dimensional, de forma e com elevado acabamento superficial. É, usualmente, empregado nas etapas finais de produção e por este motivo tornou-se um processo de responsabilidade, no qual não se admite perdas das peças, pois nessa fase estas já possuem um elevado valor agregado, devido às inúmeras operações a que foram submetidas previamente (OLIVEIRA et al.,1992; HASSUI & DINIZ, 2003).

A geometria irregular da ferramenta abrasiva – denominada rebolo, as múltiplas arestas cortantes, as altas velocidades de corte, as pequenas profundidades de corte definidas em função do tamanho dos grãos e outra infinidade de variáveis envolvidas gerou, segundo Malkin (1989) uma crença errônea de que o processo de retificação é de difícil entendimento e que qualquer estudo visando compreendê-lo fosse em vão. A propagação desta idéia fez com que o processo de retificação fosse o último a ser estudado dentre todos os processos de usinagem existentes na atualidade. Somente nas últimas décadas é que a retificação tornou-se alvo freqüente de pesquisadores, os quais, mais tarde, verificaram que a sensibilidade à alteração das variáveis poderiam ser

visualizados como modelos médios, facilitando desta forma, toda a análise e interpretação acerca das descobertas experimentais.

As investigações envolvendo o processo de retificação garantiram-lhe novas aplicações, além das quais este desempenhava inicialmente. Novas tecnologias como a utilização de rebolos superabrasivos e a aplicação de altas velocidades, impulsionam a realização de novos estudos, que permitem uma otimização e monitoração do processo, tornando-o apto a ser empregado nas indústrias. O monitoramento se fez necessário para que se alcançasse um melhor controle da operação de retificação, atingindo desta forma, maior produtividade do sistema de manufatura. Todavia, mesmo com a possibilidade de monitoramento, se faz necessário a presença de operadores experientes, os quais em função do ‘felling’ adquirido por meio de anos de trabalho, podem tomar decisões baseando-se em critérios subjetivos (DORNFELD, 1999; JACKSON et al., 2001; CHEN et al., 2002; HASSUI, 2002).

Em seguida apresentar-se-á a operação de retificação cilíndrica interna de mergulho, suas principais características e os parâmetros de corte envolvidos.

2.1.1 A origem da usinagem com abrasivos

Malkin (1989) relata que homens primatas descobriram que podiam afiar suas facas de pedras pressionando-as contra pedras arenosas. Posteriormente com a invenção da cerâmica, os abrasivos, principalmente a sílica, foram utilizados na confecção de utensílios domésticos. A retificação de metais só teve início no antigo Egito cerca de 2000 a.C., correspondendo com o início da metalurgia e ganhou valor no mundo oriental por permitir a confecção de ferramentas pontiagudas e ornamentos. No entanto, somente no início do século XIX, na Índia, surgiu o primeiro rebole, o qual era constituído por grãos abrasivos feitos de coríndon e diamante, sendo o ligante uma goma a base de resina.

De acordo com Oliveira (1988) apud Catai (2004), a primeira retificadora de superfícies cilíndricas foi construída em 1872 e atingia velocidades de no máximo 10 m/s. Atualmente, pesquisas relatam a utilização de 500 m/s e muitas retificadoras de produção já podem alcançar 200 m/s (HITCHINER, 2001).

2.1.2 Caracterização do processo de retificação

Segundo Graf (2004) e Diniz et al. (2000) o processo de retificação, definido em função da superfície a ser retificada, pode ser classificado em:

- Retificação cilíndrica externa entre pontas (de mergulho e longitudinal);
- Retificação cilíndrica externa sem centros (de mergulho e longitudinal);
- Retificação cilíndrica interna (de mergulho);
- Retificação plana e plana de perfil;
- Retificação de flancos de dentes de engrenagem;
- Retificação de roscas.

A operação de retificação cilíndrica interna de mergulho, a qual será empregada neste trabalho e os principais parâmetros do processo são caracterizados na figura 2.1.

Os parâmetros ilustrados na figura 2.1 são: velocidade de corte do rebolo v_s , velocidade da peça v_w , diâmetro do rebolo d_s , e também os diâmetros interno e externo da peça, d_i e d_e , respectivamente. Fazendo-se o correlacionamento entre todos estes parâmetros e, ainda outros, tais como avanço e vazão do fluido, têm-se a caracterização da operação de retificação cilíndrica interna de mergulho.

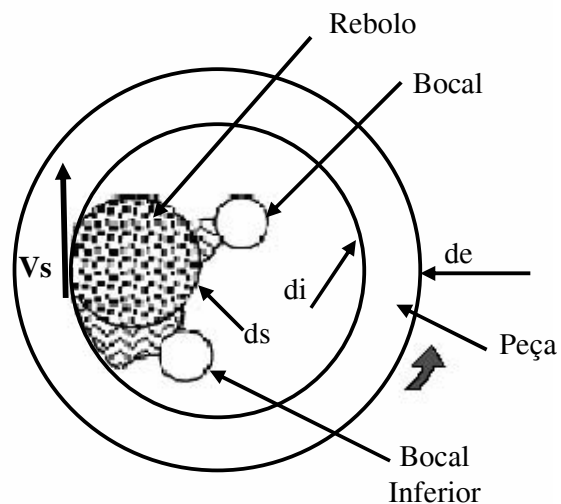


Figura 2.1 – Caracterização da operação de retificação cilíndrica interna e principais parâmetros envolvidos (Chen et al., 2002).

2.1.3 O Ciclo de Retificação

O ciclo de retificação é definido como a combinação da execução de vários fatores que variam desde o posicionamento e fixação inicial da peça na máquina até o momento de retirada da mesma, seguindo uma série de especificações pré-estabelecidas. A otimização do processo de retificação demanda um extenso conhecimento, que habilita o correto inter-relacionamento entre os parâmetros de entrada e as variáveis de saída (HASSUI & DINIZ, 2003).

A figura 2.2 apresenta o avanço real e teórico do rebolo observado durante o ciclo de retificação cilíndrica.

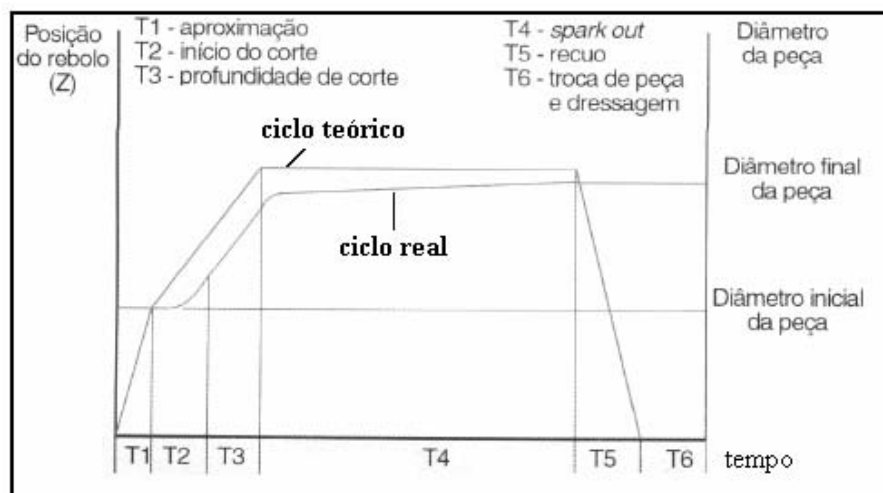


Figura 2.2 – Esquematização gráfica de um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho (Hassui et al., 1998, adaptada).

Os períodos indicados no gráfico são caracterizados, de acordo com Hassui & Diniz (2003) por:

- T1: corresponde ao deslocamento da ferramenta em relação à peça, sem a ocorrência de remoção de material;
- T2: neste instante se dá o contato entre o rebolo e a peça, proporcionando deformações elásticas em ambos e também na máquina. Estas deformações são responsáveis pelo atraso entre a posição real do rebolo e a posição indicada pelo comando numérico da máquina. No momento do

contato observa-se aumentos momentâneos da potência consumida pelo motor da máquina e também dos índices de emissão acústica;

- T3: atinge-se a profundidade total de corte estabelecida para um ciclo de retificação;
- T4: corresponde ao período de centelhamento (*spark-out*), em que não há avanço do rebolo, permitindo, desta forma, eliminar as deformações adquiridas durante o período T₂. O tempo de *spark-out* é de fundamental importância dentro de um ciclo de retificação, pois é neste momento que se atinge apertadas tolerâncias dimensionais e geométricas com reduzidos valores de rugosidade superficial que caracterizam o processo de retificação;
- T5: afastamento do rebolo, permitindo a retirada da peça usinada e a colocação de uma outra peça a ser trabalhada;
- T6: realização da operação da dressagem, a qual é composta pelo movimento do rebolo até o dressador, pela dressagem propriamente dita e pelo retorno do rebolo até a posição de trabalho.

A otimização do processo de retificação citada anteriormente compreende em grande parte a busca de métodos que permitam minimizar os tempos descritos acima sem, no entanto, afetar a qualidade do produto final.

2.1.4 Principais Parâmetros Associados ao Processo de Retificação

Neste item são apresentados os principais parâmetros envolvidos no processo de retificação cilíndrica, que se destacaram no decorrer deste trabalho.

2.1.4.1 Comprimento de contato (l_c)

Um dos parâmetros mais utilizados e de grande importância na retificação é o arco ou comprimento de contato (l_c), o qual define a extensão de contato entre o rebolo e a peça durante a operação de retificação. Malkin (1989) fez um equacionamento do comprimento de contato, desprezando as deformações e movimentos envolvidos no processo. Este equacionamento envolve a profundidade de corte a e o diâmetro d_s do rebolo, como pode-se verificar na equação 2.1 apresentada abaixo:

$$l_c = (a \cdot d_s)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

2.1.4.2 Diâmetro equivalente (d_e)

King & Hahn (1986) apud Hassui (2002) afirmam que a diferença de curvatura entre rebolo e peça interfere no comprimento de contato. Por este motivo estabeleceu-se o diâmetro equivalente capaz de indicar o grau com que a superfície do rebolo e da peça se adaptam. Este parâmetro representa, no caso da retificação cilíndrica, o diâmetro que o rebolo empregado numa retificação tangencial plana deveria ter para proporcionar a mesma geometria de corte e o mesmo comprimento de contato.

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm \left(\frac{d_s}{d_w} \right)} \quad (2.2)$$

onde:

d_s é o diâmetro do rebolo;

d_w é o diâmetro da peça.

Malkin (1989) afirma que, o sinal positivo representa a operação de retificação cilíndrica externa e o negativo a interna. No caso da retificação plana, d_w assume valor infinito.

2.1.4.3 Espessura de corte equivalente (h_{eq})

De acordo com Peters & Decneut (1975) apud Hassui (2002), a espessura da camada de material removida pelo rebolo numa volta completa denomina-se de espessura equivalente de corte (h_{eq}). Este parâmetro permite quantificar uma condição de trabalho e pode ser definido como a relação entre a taxa de remoção específica do material (Q_w') e a velocidade periférica do rebolo (V_s). A espessura de corte equivalente pode ser estabelecida ainda em função dos parâmetros de entrada: V_f (velocidade de mergulho ou avanço), como pode-se verificar na equação 2.3:

$$h_{eq} = \frac{Q_w'}{V_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot V_f}{60 \cdot 1000 \cdot V_s} \quad (2.3)$$

Segundo Malkin (1989), a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada ao comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas tais como forças de corte, rugosidade, topografia da ferramenta e outras. Diniz et al. (2000) afirmam que um aumento do h_{eq} reflete no aumento das forças de corte e dos valores de rugosidade e ainda na diminuição da vida do rebolo.

2.1.4.4 Parâmetros de Corte

2.1.4.4.1 Profundidade de Corte (a)

A adoção de uma profundidade de corte elevada é responsável por ampliar a área de contato entre peça e ferramenta, aumentando conseqüentemente, o número de grãos em contato com a superfície que esta sendo usinada. Além disso, uma profundidade de corte maior resulta em uma espessura de corte equivalente também maior, como foi verificado na equação 2.3. Elevados valores de h_{eq} implicam num acréscimo das forças

de corte, as quais são responsáveis por causar deformações entre peça e ferramenta. Rowe & Morgan (1993) apud Catai (2004) afirmam que as defleções ocorridas durante o movimento de avanço da ferramenta abrasiva pode prejudicar a integridade superficial da peça usinada. Desta forma, deve-se empregar uma profundidade de corte compatível com o tipo de rebolo e de material que está sendo utilizado.

2.1.4.4.2 Velocidade de Mergulho (V_f)

A velocidade de mergulho é definida como uma taxa de remoção de material. Esta variável sofre influência da rigidez da retificadora, da quantidade de material a ser removida, do acabamento desejado, da quantidade de fluido de corte envolvida no processo, do material da peça etc.

Baldo (1994) afirma que no início do processo de retificação ou desbaste, remove-se cerca de 95% do material da peça, sendo que a velocidade de mergulho deve estar entre 0,4 a 2,0mm/min. Já para o acabamento, a velocidade de mergulho deve estar entre 0,1 a 0,3mm/min.

2.1.4.4.3 Velocidade de Corte (V_s)

Graf (2004) afirma que a velocidade de corte do rebolo, em m/s, pode ser expressa por:

$$V_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (2.4)$$

em que:

d_s é o diâmetro do rebolo;

n_s é a rotação do rebolo.

Esta velocidade é capaz de alterar as principais variáveis de saída do processo, entre elas força tangencial de corte, rugosidade, desvios de circularidade e desgaste diametral da ferramenta abrasiva.

Bianchi et al. (1996) e Graf (2004) afirmam que aumentando-se V_s verifica-se a exposição de um maior número de arestas cortantes ativas por unidade tempo, resultando em uma redução da carga exercida sobre cada grão abrasivo. Tal fato pode ser observado pela diminuição dos valores de força tangencial de corte. Nestas condições de trabalho o rebolo possui uma dureza dinâmica elevada, pois os grãos apresentam friabilidade reduzida, ou seja, apresentam uma elevada resistência quando submetido às forças e impactos do processo.

2.1.4.4 Velocidade da Peça (V_w)

A velocidade periférica da peça na operação de retificação interna de mergulho, em m/min, é definida por Graf (2004) da seguinte forma:

$$V_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} \quad (2.5)$$

onde:

d_w é o diâmetro interno da peça;

n_w é a rotação da peça.

Ainda segundo Graf (2004) um aumento da velocidade da peça ocasiona um aumento da taxa de remoção de material, com a formação de cavacos mais grossos. Verifica-se também um aumento da carga sobre cada grão, aumentando os valores da força tangencial de corte. Desta forma, um aumento da velocidade da peça confere ao rebolo um comportamento macio.

2.1.5 Mecanismo de formação de cavaco

Malkin (1989) afirma que a remoção de material durante a operação de retificação se dá por meio da interação dos grãos abrasivos com a peça, formando cavacos por cisalhamento. O autor citado concluiu que o método de remoção ocorre por cisalhamento após comparar os cavacos obtidos na retificação com cavacos de outros processos de usinagem, atingindo-se uma semelhança microscópica bastante grande.

Os esforços gerados no processo responsáveis pela remoção de material e conseqüentemente, pela formação de cavaco, podem ser associados à potência de corte P , por meio do seguinte equacionamento definido por Malkin (1989):

$$P = F_t \cdot (V_s \pm V_w) \quad (2.6)$$

Onde:

F_t é a força tangencial de corte;

V_s é a velocidade periférica do rebolo;

V_w é a velocidade periférica da peça.

O sinal positivo é empregado em relação à retificação discordante e o sinal negativo para retificação concordante.

Existe ainda um outro parâmetro relacionado à potência e as condições de corte, definido como energia específica de retificação U_c , que é a energia por unidade de volume de material removido. Tal grandeza é expressa em J/mm^3 e pode ser equacionado matematicamente de acordo com a equação 2.7 (MALKIN, 1989):

$$u = \frac{P}{Q_w} \quad (2.7)$$

Sendo que:

P é a potência de corte;

Q_w é a taxa de remoção volumétrica, que no processo de retificação pode ser expressa da seguinte forma:

$$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b \quad (2.8)$$

Onde

d_w é o diâmetro da peça;

v_f é a velocidade de avanço do rebolo;

e b é a largura do rebolo.

Malkin (1989) afirma que a energia específica envolvida no processo de retificação é muito maior do que nos outros processos de usinagem, principalmente quando se trabalha com baixos índices de h_{eq} . Isto ocorre pelo fato de que apenas uma parcela da energia é empregada no processo de remoção de cavaco, sendo que a grande porcentagem restante é envolvida em outros mecanismos, como por exemplo, no atrito existente entre as regiões planas dos grãos e a peça e na deformação plástica da peça antes da formação do cavaco. Partindo deste princípio, Malkin (1989) dividiu o processo de remoção de cavaco em três fases, as quais podem ser classificadas em:

Fase 1: momento do primeiro contato entre grão abrasivo e peça. Nesta etapa ocorre apenas a deformação elástica do material da peça, sendo que toda a energia fornecida ao processo é consumida pelo atrito, calor e deformações.

Fase 2: nesta etapa os grãos abrasivos continuam penetrando na peça, proporcionando deformações plásticas, escoamento lateral e recuperação das deformações elásticas ocorridas no estágio anterior. A maior penetração dos grãos implica em maiores forças de atrito entre peça e rebolo e desta forma, grande parte da energia continua sendo dissipada por deformações, atrito e calor.

Fase 3: nesta fase a aresta de corte atinge um valor de penetração crítico, que por consequência gera uma pressão também crítica P_c . Tal pressão é definida como sendo a pressão mínima para que ocorra a ruptura do material. Neste momento inicia-se a formação de cavaco e grande parte da energia passa a ser consumida no cisalhamento do material.

A figura 2.3 apresenta uma esquematização das três fases envolvidas no processo de remoção de cavacos:

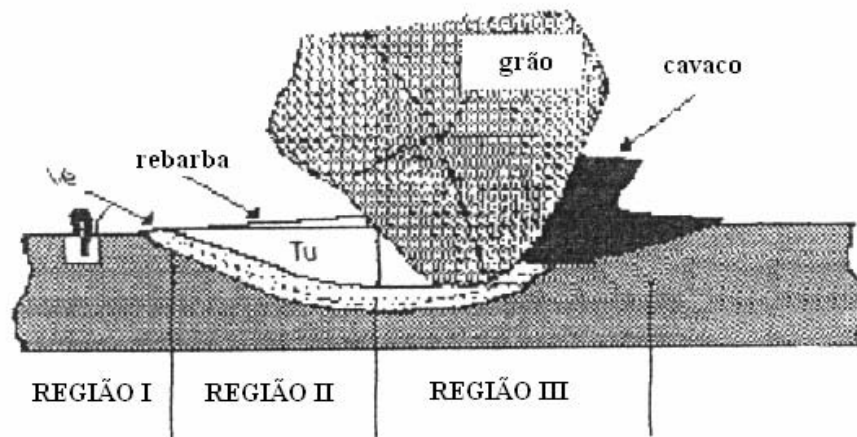


Figura 2.3 – Três regiões de micro-fenômenos envolvidos no processo de formação de cavacos na retificação (KÖNIG, 1980 apud HASSUI, 2002).

Depois de formado, o cavaco é removido da região de corte por meio das porosidades do rebolo, sendo posteriormente expulso da ferramenta pela ação da força centrífuga ou pela lavagem do rebolo feita pelo fluido de corte. Se os cavacos não forem eficientemente removidos das porosidades do rebolo, tem-se perda do poder de corte da ferramenta, aumento da vibração do processo e por consequência, incremento da temperatura na região de corte e também nos valores de rugosidade superficial da peça.

A deformação lateral do material da peça proporciona um aumento da profundidade de retificação possibilitando a atuação de grãos abrasivos que estão menos expostos (CHEN & ROWE, 1995 apud HASSUI, 2002).

2.2 Características e propriedades dos rebolos

2.2.1 Introdução

Os rebolos são classificados como ferramentas abrasivas que se caracterizam por possuírem um grande número de grãos abrasivos ligados por uma matriz aglomerante. Cada um destes grãos abrasivos dá origem a arestas cortantes com geometrias indefinidas que agem simultaneamente proporcionando a remoção do material (MALKIN, 1989).

Ainda de acordo com Malkin (1989) o rebolo pode ser definido como sendo um sistema trifásico constituído por grãos abrasivos, aglomerantes e porosidade. Tais elementos somados representam 100% do volume do rebolo.

Deste modo, o desempenho do rebolo está relacionado ao tipo e ao tamanho do grão abrasivo, as propriedades abrasivas do material aglomerante e ainda a porosidade do conjunto (MALKIN, 1989).

Hutchings (2001) apud Hassui (2002) afirma em seu trabalho que para um abrasivo conseguir usinar um material sua dureza deve ser, no mínimo, 1,2 vezes maior.

A porosidade é de vital importância no desempenho do rebolo pelo fato de ser responsável pela acomodação e posterior expulsão do cavaco da zona de corte (MALKIN, 1989; HASSUI, 2002).

Rebolos destinados à retificação são fabricados em diversos tipos de grãos em uma ampla faixa de tamanhos, combinados a diversos tipos de aglomerantes em composições distintas. Deste modo, estas ferramentas adaptam-se as diversas máquinas retificadoras e aos inúmeros trabalhos a serem executados, conduzindo a uma quase interminável diversidade de rebolos (MALKIN, 1989).

2.2.2 Descrição e caracterização dos componentes do rebolo

2.2.2.1 Materiais abrasivos

Os grãos abrasivos podem ser classificados em duas categorias de acordo com sua dureza, sendo elas convencionais e superabrasivos. Grãos convencionais têm dureza próxima à 2000kgf/mm^2 , enquanto os grãos superabrasivos possuem dureza na faixa de 4500kgf/mm^2 . Vale ressaltar que tais valores são obtidos por testes de dureza KNOOP (SHAW, 1996).

As características dos abrasivos que determinam sua eficácia na remoção de material são dureza e estrutura do cristal, forma do grão, friabilidade ou durabilidade do grão e também a química do abrasivo. As diferenças nas propriedades de um mesmo tipo de abrasivo são decorrentes de variações químicas e/ou características estruturais intrínsecas ao processo de manufatura. Ressalta-se que a friabilidade de um material é decorrente de sua pureza (MALKIN, 1989).

No grupo dos abrasivos, destacam-se os grãos de óxido de alumínio (Al_2O_3) e os de carboneto de silício SiC. O primeiro caracteriza-se por apresentar a menor dureza dentre todos os abrasivos, todavia tem a vantagem de ser relativamente resistente ao impacto. É empregado na retificação de materiais ferrosos. Os abrasivos de SiC são recomendados para retificação de aços não-ferrosos ou aços com elevado teor de carbono em sua composição, pois apesar de ser mais duro que o de óxido de alumínio, quando empregados na usinagem de materiais ferrosos, reagem quimicamente com o elemento ferro, ocasionando um desgaste acentuado dos grãos (HASSUI, 2002).

Os grãos de óxido de alumínio podem ser classificados em categorias de acordo com sua composição química, sendo elas: alumina, alumina semi-friável, alumina branca, alumina rosa e *sol-gel*. Este último abrasivo descoberto há pouco tempo, caracteriza-se por sua elevada pureza (99,6% em peso) e por sua microestrutura uniforme. Tais fatores refletem de maneira positiva nos valores de rugosidade e desgaste diametral do rebolo (JACKSON & MILLS, 2000).

Os abrasivos de modo geral possuem duas propriedades fundamentais que refletem diretamente no desempenho do rebolo durante o processo de usinagem: tenacidade e friabilidade. A tenacidade é um parâmetro relacionado diretamente à quantidade de trabalho (energia) necessária para fraturar o grão abrasivo. Friabilidade é definida como sendo o conceito oposto de tenacidade, ou seja, corresponde à facilidade para se quebrar um grão abrasivo quando submetido à determinada força ou impacto. Sabe-se que a friabilidade de um material está relacionada à pureza deste. Em relação aos grãos destacados anteriormente, pode-se afirmar que os grãos de Óxido de Alumínio (Al_2O_3) apresentam menor friabilidade que os grãos de carboneto de silício (SiC).

Os grãos superabrasivos são representados principalmente pelo diamante e pelo Nitreto Cúbico de Boro (CBN). São denominados desta forma pelo fato de apresentarem dureza bem mais elevada que abrasivos convencionais, como demonstrado acima. Rebolos compostos por estes tipos de grão são empregados na retificação de materiais de difícil usinabilidade, tais como aços rápidos, aços alta liga e aços ligados ao Ni, Cr, Ti e outros (NUSSBAUM, 1988; BIANCHI et al., 2001).

O Nitreto Cúbico de Boro (CBN) é um material sintético obtido através da transformação alotrópica do nitreto de boro hexagonal, mediante elevadas pressões e temperaturas. Com altíssima dureza ($K_{100} = 4700 \text{ Knoop}$), independente da orientação dos cristais, apresenta vantagens na aplicação quando comparado ao diamante, devido à

possibilidade de usinagem de metais ferrosos. Isso porque, apesar da extrema dureza do diamante ($K_{100} = 7000 \text{ Knoop}$), o seu emprego na usinagem de aços, principalmente hipoeutéticos, é dificultado pela tendência do carbono existentes na estrutura cristalina do diamante se difundir no ferro, sob condições de pressão e temperatura usuais de usinagem (BERTALAN, 1997, FELIPE JR., 1992). Além disso, comparado ao diamante, o CBN apresenta uma resistência elevada à temperatura. Enquanto que no diamante a grafitação se inicia a partir de 900°C , o nitreto de boro cúbico, à pressão atmosférica, apresenta estabilidade até 2000°C . Bertalan (1997) atenta ainda para a queda acentuada da dureza do diamante com o aumento de temperatura a partir de 500°C . Em 800°C tal dureza já é inferior à do CBN na mesma temperatura.

De forma geral, segundo Bianchi & Oliveira (1993) o desgaste do ligante está associado à geometria do cavaco produzido. Deste modo, a variação das condições de retificação é responsável por modificar a geometria média dos cavacos, prolongando assim a permanência do grão abrasivo na superfície do rebolo ou provocando sua liberação. Tal mecanismo permite que se controle as características topográficas do rebolo pela influência da geometria do cavaco sobre o ligante.

Rebolos superabrasivos para retificação de alta velocidade têm requisitos especiais em relação à resistência à fratura e ao desgaste. Boas características de amortecimento, alta rigidez e boa condutibilidade térmica são também desejáveis. Estas ferramentas, normalmente consistem em um corpo de alta resistência mecânica e em uma camada abrasiva relativamente fina, ligada ao corpo por um adesivo de alta resistência. Altas velocidades de corte são atingíveis acima de tudo com sistemas de ligas metálicas. Um método que usa tais sistemas de ligas é a eletrodeposição galvânica. Além da necessidade de escolher o sistema de liga apropriado para o rebolo, de acordo com os requisitos da aplicação em questão, a resistência do corpo do rebolo deve ser melhorada para ser empregada em processos com elevadas velocidades de corte (JACKSON et al., 2001).

Segundo Jackson et al. (2001) um aumento da velocidade do rebolo pode levar a uma melhoria da qualidade da peça ou a um aumento da produtividade. Quando a taxa de remoção de material também é aumentada, a força tangencial, que também é crescente, resulta em um aumento maior na potência de retificação. Porém, a quantidade de energia térmica introduzida na peça é menor do que na situação inicial quando se tem o mesmo volume de peça usinada, apesar da velocidade de corte e da taxa de remoção

de material serem maiores. Essas considerações mostram que a produtividade da usinagem pode ser aumentada empregando-se retificação de alta velocidade sem, no entanto, ter que aceitar efeitos térmicos indesejáveis em componentes retificados. Nesse caso, a ação do refrigerante e a natureza do grão abrasivo são de extrema importância para dissipar o calor gerado e com isso assegurar o acabamento e a integridade da superfície da peça retificada, bem como a vida do rebolo.

Um fator limitante para o emprego de rebolos superabrasivos reside nos elevados custos de aquisição deste tipo de ferramenta. No entanto quando se faz uma análise global dos custos, observa-se que utilizando-se rebolos de CBN tem-se uma redução do tempo de retificação, além de um menor número de trocas de ferramentas e paradas para ajuste visando compensar o desgaste do rebolo. Todos estes fatores são responsáveis por uma redução de 40% dos custos totais do processo de retificação.

2.2.2.2 Tamanho do grão abrasivo

A classificação do tamanho de grão é feita, segundo Malkin (1989), pelo método do peneiramento. O parâmetro empregado na classificação é denominado *mesh*, que corresponde à quantidade de fios por polegada linear existentes na peneira. A metodologia da classificação consiste em passar os grãos por uma seqüência de cinco peneiras, normalmente com aberturas reduzidas num fator $\sqrt{2}$. Cada peneira deve reter uma certa quantidade de grãos, de modo que a peneira que reter a maior porcentagem de grãos, indicará o número do grão. Logo, observa-se que não há um tamanho exato de grão e sim uma faixa de dimensões.

Grãos maiores, os quais possuem números menores, são empregados em operações mais grosseiras, como por exemplo, desbaste. Enquanto grãos menores, classificados com maiores números, possibilitam a obtenção de acabamentos finos dentro de apertadas faixas de tolerância dimensional.

2.2.2.3 Dureza do rebolo

A dureza de um rebolo está relacionada à dificuldade de remoção dos grãos abrasivos de sua superfície, ou ainda, à dificuldade de proporcionar o rompimento entre o grão e o material aglomerante. Esta dureza é diretamente dependente das propriedades

mecânicas do material aglomerante, pois se este possuir elevada resistência mecânica, reduzirá a possibilidade de ruptura dos grãos abrasivos, devido a uma satisfatória acomodação dos impactos sofridos pelo rebolo. Além disso, uma elevada resistência ao desgaste do material aglomerante dificulta a remoção de grãos inteiros, pois desta forma a ancoragem dos grãos se mantém estável durante toda a vida do rebolo. Deste modo, observa-se que as características do material aglomerante são fundamentais para determinar a dureza dos rebolos (NUSSBAUM, 1988). A classificação quanto a dureza do rebolo é feita por letras que vão de A a Z em ordem crescente de dureza. Malkin (1989) argumenta que na indústria em geral, utiliza-se rebolos com durezas intermediárias.

Via de regra, rebolos denominados moles são empregados na retificação de aços endurecidos tratados termicamente, enquanto rebolos duros são aplicados na usinagem de aços moles. Esse procedimento é adotado pelo fato de que sob as mesmas condições de usinagem, rebolos duros tendem a gerar mais calor e vibração que os moles. Isso acontece porque a alta resistência ao desgaste do ligante impossibilita a expulsão dos grãos, mesmo quando estes já estão cegos, gerando superfícies planas de corte aumentando desta forma o atrito do rebolo com a peça. A geração excessiva de calor se não controlada, pode provocar danos térmicos à peça, tais como desvios dimensionais e transformações de fase, resultando no descarte da mesma. Em relação aos rebolos moles, sabe-se que estes sofrem auto-afiação durante o processo de usinagem. Isto ocorre porque o rebolo perde os grãos cegos e proporciona a quebra de novos, gerando deste modo, novas arestas cortantes (KING & HAHN, 1986 apud HASSUI, 2002).

2.2.2.4 Estrutura do rebolo

Este parâmetro está relacionado à concentração volumétrica dos grãos abrasivos contidos no rebolo. Índices elevados correspondem a menores concentrações de grãos. Malkin (1989) afirma empiricamente que uma unidade adicional no índice de referência corresponde a uma redução de 2% do número de grãos abrasivos.

Ainda segundo Malkin (1989) o limite máximo da concentração dos grãos abrasivos é determinado por limitações de empacotamento e variam usualmente de 40% a 60%. Grãos maiores e mais simétricos proporcionam um maior fator de empacotamento que grãos menores com formas assimétricas.

A estrutura do rebolo está associada também à porosidade da ferramenta abrasiva, pois quanto menores estas forem, mais fechada a estrutura, com maior concentração de grãos e conseqüentemente maior dureza. De acordo com King & Hahn (1986) apud Hassui (2002) uma porosidade ideal é aquela capaz de estar suficientemente aberta para permitir a remoção do cavaco e a introdução do fluido de corte na região de corte, mas por outro lado, suficientemente fechada para garantir um número mínimo de grãos abrasivos atuando na remoção do material. Ressalta-se que uma estrutura fechada apresenta maior número de grãos em contato com a peça durante o corte, fato que proporciona melhor acabamento, pois cada grão é responsável pela retirada de uma quantidade menor de material. No entanto, neste caso existe uma tendência a queima e ao empastamento, devido a dificuldade de retirada do cavaco da região de corte.

As porosidades são conseguidas adicionando-se materiais voláteis a mistura de grãos abrasivos e aglomerantes. Assim quando o rebolo é levado ao forno, os elementos voláteis evaporam-se formando poros (vazios) nos locais em que se encontravam (MALKIN, 1989).

2.2.2.5 Materiais aglomerantes

Os grãos abrasivos de um rebolo são mantidos unidos pela ação de materiais aglomerantes. Estes compostos devem resistir às forças de retificação, elevadas temperaturas, forças centrípetas oriundas dos elevados níveis de rotação da ferramenta e ainda aos ataques químicos provocados por componentes dos fluidos de corte. Os aglomerantes são responsáveis por assegurar a rigidez do rebolo e também pela manutenção dos grãos abrasivos, expulsando-os no momento adequado (MALKIN, 1989).

Para rebolos convencionais existem basicamente seis tipos de aglomerantes, sendo eles: resinóide, shellac, oxiclорidos, borracha, silicatos e vitrificados. Os superabrasivos utilizam fundamentalmente aglomerantes resinóides, metálicos e vitrificados. Em alguns casos, os rebolos são confeccionados eletrodepositando-se uma camada de abrasivos sobre o material interno do rebolo, dispensando a utilização de aglomerantes (MALKIN, 1989).

No que diz respeito aos ligantes vitrificados observa-se que estes estão presentes em cerca de 50% dos rebolos convencionais, sendo utilizados principalmente para a execução de retificação de precisão, devido a sua elevada rigidez. Já os aglomerantes resinóides são aplicados em rebolos destinados a execução de desbastes, devido a elevada resistência mecânica e a capacidade de absorver impactos (MALKIN, 1989).

De acordo com SCHUITEK et al. (2001) e KOELSCH (2003), são utilizados normalmente quatro tipos de ligas ou ligantes na confecção de rebolos superabrasivos, a saber:

1. Resinóides: obtidos por prensagem a quente de resinas, materiais de enchimento e o superabrasivo. Podem se deteriorar e perder a capacidade de retenção dos grãos, se trabalhar em temperaturas acima de 250°C. Apresentam menor dureza entre todas as ligas, caracterizando um corte "macio e frio", com forças de corte reduzidas. São as ligas mais utilizadas atualmente;

2. Vitrificadas ou cerâmicas: apresentam durezas superiores às das resinóides e devido a isso, juntamente com o fato de ter natural porosidade, prestam-se a tarefas que exigem elevadas taxas de remoção. Os níveis de porosidade da matriz nos rebolos de ligas vitrificadas estão entre 10 e 25% comparados aos 2% da maioria dos rebolos de liga resinóide e de liga metálica. Esta porosidade abre espaço para a formação de cavaco e para o fluxo de refrigerante. As ligas vitrificadas estão se consolidando rapidamente como o tipo mais popular entre os rebolos de CBN. Por esses motivos, a liga vitrificada foi escolhida para a realização dos ensaios do presente trabalho. Os rebolos de CBN com ligas vitrificadas requerem pressões de retificação razoavelmente altas para cortar e, portanto funcionam melhor em retificadoras de alta potência. A fragilidade das ligas vitrificadas e as altas pressões necessárias no processo de retificação fizeram com que os fabricantes produzissem rebolos em segmentos, para que a liga possa expandir e não trincar a altas velocidades. Esta opção tem como desvantagem o elevado custo de fabricação. É utilizado para retificação de eixos de comando de válvulas e virabrequins;

3. Metálicas sinterizadas: feitas em bronze apresentam maior dureza do que os ligantes resinóides e vitrificados e, conseqüentemente, maiores resistências ao desgaste (maior vida), porém com um corte mais "duro". A sua principal aplicação concentra-se na retificação de materiais como vidro e pedras ou quando se tem grande exigência na manutenção de perfis agudos;

4. Metálicas por eletrodeposição (ou galvânicas): a sua principal característica é a fixação de uma única camada de grãos abrasivos por níquel. Garante uma forte ancoragem do grão (ficando até 50% expostos), possibilitando a existência de grandes espaços para alocação de cavacos, proporcionando desta forma, grande agressividade à ferramenta.

5. Concentração: indica qual o percentual de grãos abrasivos que formam a camada abrasiva. A escolha de uma maior concentração implica maior quantidade de grãos atuando sobre a peça e um melhor acabamento superficial. Entretanto, os espaços entre os grãos tendem a ficar insuficientes, prejudicando a remoção de cavacos e pode aumentar as temperaturas e as forças de retificação. Embora os rebolos com altas concentrações de material abrasivo durem mais e produzam acabamentos melhores com mais rapidez do que rebolos de baixas concentrações, em contrapartida eles também exigem maior potência para movimentar o grande número de arestas de corte em contato com a peça. Além disso, rebolos com altas concentrações de material abrasivo normalmente são mais difíceis de dressar e necessitam de sistemas especiais para perfilar o rebolo superabrasivo (KOELSCH, 2003).

Jackson & Mills (2000) afirmam que a escolha do aglomerante deve ser feita considerando-se o tipo e tamanho do rebolo, condições do trabalho, vida do rebolo e ainda a relação custo/benefício de se empregar ligantes mais elaborados. Observa-se que as velocidades tangenciais de corte em que o rebolo deve operar são determinadas de acordo com o tipo do aglomerante, dependendo da resistência mecânica dos mesmos. Tais velocidades são fornecidas pelos fabricantes de rebolos (MALKIN, 1989).

Malkin (1989) atenta ainda para o fato de que grãos abrasivos e aglomerantes devem possuir coeficientes de dilatação térmica análogos para que deste modo, não ocorra formação de tensões internas durante o trabalho a elevadas temperaturas.

De acordo com Nussbaum (1988) o processo de fabricação de um rebolo compreende as seguintes etapas: mistura, prensagem, secagem, queima, acabamento, balanceamento, testes, controles e finalmente, expedição. Balanceamentos são feitos visando compensar uma eventual distribuição heterogênea dos grãos abrasivos no interior do rebolo.

2.2.3 Dressagem e topografia de rebolos

O atrito e os elevados esforços existentes entre peça e ferramenta são responsáveis por desgastar as ferramentas de corte. No caso do reboło, observa-se uma modificação considerável de sua topografia, prejudicando sua capacidade de remoção de material. Nestes casos se faz necessário de preparar o reboło, recompondo a geometria a fim de restaurar a agressividade da ferramenta (MALKIN, 1989).

A operação responsável pelo restabelecimento da face de trabalho do reboło abrasiva chama-se dressagem, conhecida ainda por afiação, retificação do reboło, dressamento ou diamantação, a qual segundo Oliveira (1989) apud Baldo (1994) tem como principais objetivos:

- Obtenção de concentricidade da face de trabalho em relação ao seu eixo de giro;
- Restabelecimento de forma, perfilamento da face de trabalho;
- Retirada de grãos abrasivos gastos e composição de novas arestas cortantes, visando aumentar a capacidade de remoção de material da ferramenta abrasiva.

Oliveira et al. (1992) afirmam que o ponto de dressagem ou avivamento determina o fim de vida de trabalho do reboło, pois nesta etapa os grãos se encontram excessivamente gastos e impossibilitados de remover material de forma adequada. A operação de dressagem deve ser feita o mais próxima possível deste ponto, pois se esta operação for executada após o momento ideal, possibilita o surgimento de trincas, queimas superficiais ou ainda a fabricação de peças com elevados índices de rugosidade. Caso executada previamente, propicia um desgaste desnecessário do reboło, pois este ainda estaria apto a produzir peças dentro das especificações exigidas. Além disso, um maior número de dressagens é responsável por reduzir o tempo útil de produção, elevando o custo do produto final. O momento de execução da dressagem depende em grande escala da sensibilidade e experiência do operador.

Segundo Hassui (2002) a dressagem de rebolos convencionais consiste em pressionar a superfície do reboło em rotação contra uma ferramenta de dressagem com avanço transversal a superfície do reboło. Malkin (1989) afirma ainda ser interessante a execução de alguns passes sem avanço, obedecendo ao principio de *spark-out*, o qual é

responsável pela eliminação das deformações elásticas surgidas no sistema máquina-peça-ferramenta durante a operação de dressagem. Deste modo, é possível melhorar a qualidade da topografia produzida na superfície do rebolo. Todavia, este procedimento é pouco empregado na indústria, por ampliar o tempo ocioso da máquina.

As ferramentas de dressagem são definidas fundamentalmente segundo Oliveira & Purquério (1989) apud Baldo (1994) em dois grupos, sendo eles: dressadores estáticos e rotativos. Dentro da classe dos estáticos existem os dressadores de ponta única e os multigranulares, denominados *fliese*, os quais possuem grãos homogêneos de diamante distribuídos uniformemente em linhas. Neste trabalho utilizou um dressador do tipo *fliese*, por ser este o tipo mais comumente empregado na indústria.

De acordo com Graf (2004) o bom desempenho de dressadores do tipo *fliese* está associado à execução da operação de dressagem com grande quantidade de fluido de corte (pelo fato dos diamantes serem bastante sensíveis ao calor) e sem interrupções.

As principais vantagens da utilização dos dressadores multigranulares frente aos de ponta única, segundo a empresa Winter (2004) são:

- Execução de dressagem em rebolos convencionais e superabrasivos;
- Menor número de substituições;
- Menor possibilidade de quebra;
- Ausência de manutenção.

Vale ressaltar que em rebolos superabrasivos, além da dressagem, executa-se também a operação de perfilamento, responsável pelo ajuste de forma da topografia do rebolo, por meio da remoção de material. Em rebolos convencionais, dispensa-se tal operação, pelo fato de que este ajuste já é atingido no momento da dressagem (MALKIN, 1989).

A operação de dressagem, além de responsável pela recomposição da geometria, restaurando a topografia e conseqüentemente a agressividade do rebolo, é ainda bastante empregada quando se faz retificação de materiais dúcteis. Sabe-se que tais materiais produzem cavacos longos que impregnam na superfície do rebolo, entupindo os poros ou até mesmo soldando-se aos grãos impedindo-os de remover material. Logo, a dressagem destaca-se como um método capaz de promover a retirada destes cavacos, restaurando a capacidade de corte do rebolo (KING & HAHN, 1986 apud HASSUI, 2002; OLIVEIRA et al., 1992).

Malkin (1989) argumenta que as dressagens podem ser classificadas em finas e grosseiras. Segundo ele, dressagens grosseiras são responsáveis pela redução dos esforços durante o corte e também pela obtenção de superfícies com altos índices de rugosidade. Exatamente o oposto pode ser verificado quando se realiza uma dressagem fina, na qual o nível de fratura dos grãos abrasivos é menor.

Como resultado do mecanismo de dressagem pode-se observar dois efeitos predominantes, sendo eles o macroefeito e o microefeito. O primeiro deles, de acordo com Oliveira & Purquério (1989) apud Baldo (1994), é devido ao formato do dressador e as condições de dressagem, determinando o posicionamento das arestas cortantes na topografia do rebolo. Na verdade, o macroefeito está relacionado a rosca formada na superfície do rebolo, em função da combinação de movimentos entre rebolo e o dressador. Segundo Hassui & Diniz (2003) no macroefeito existe um pequeno número de grãos ativos, os quais individualmente são responsáveis por remover grandes quantidades de material. Isso faz com que os esforços sobre cada grão sejam grandes o que, no entanto, não impede o bom desempenho do processo (com predominância deste efeito), pelo fato das reduções das perdas com deformações plásticas e elásticas do material na zona de corte, minimizarem o total de energia envolvida no processo.

Na figura 2.4 apresentada abaixo, pode-se observar o mecanismo de dressagem de um rebolo com predominância do macroefeito:

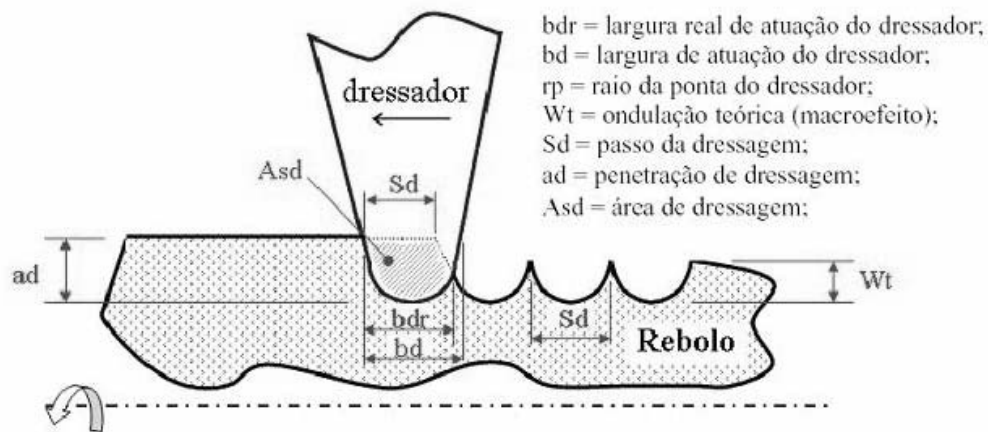


Figura 2.4 – Esquematização da operação de dressagem com dressador de ponta única (HASSUI & DINIZ, 2003 adaptada por CATAI, 2004).

O microefeito é causado pelo arrancamento de grãos abrasivos desgastados e com baixa ancoragem no aglomerante e pela fratura dos grãos abrasivos que não se

desgastaram por completo, formando novas arestas de corte. A agressividade das novas arestas formadas depende em grande escala da friabilidade do grão e das condições de dressagem. Na dressagem fina com baixa profundidade de penetração e baixo avanço do dressador, ocorre a remoção ou fratura de grãos muito pequenos, propiciando a formação de planos nas superfícies de corte dos mesmos tornando-os, desta forma, menos agressivos. Na dressagem grossa, com altas taxas de penetração e avanço, grande parte dos grãos são quebrados formando arestas maiores e mais afiadas (OLIVEIRA & PURQUÉRIO, 1989 apud BALDO, 1994). Quando este efeito prevalece, pode-se observar, segundo Hassui & Diniz (2003), um grande número de arestas cortantes que tornam o processo de formação de cavaco mais eficiente, reduzindo as perdas com deformações plásticas e elásticas do material na zona de corte.

König adup Oliveira et al. (1992) estabeleceu um parâmetro de grande importância nas operações de dressagem, utilizando-se dressador de ponta única, denominado grau de recobrimento (U_d). Segundo Graf (2004) esta grandeza determina quantas vezes um ponto da superfície do rebolo é recoberta pela largura útil do dressador (b_d), sendo s_d o avanço por volta do dressador.

$$U_d = \frac{b_d}{s_d} \quad (2.9)$$

Os resultados obtidos por König adup Oliveira (1992), mostram que quanto menor o grau de recobrimento (sendo o valor mínimo igual a 1) maior a agressividade do rebolo, fato que prejudica a qualidade superficial da peça mas favorece a remoção de grandes quantidades de material. Conseqüentemente, quanto maior o grau de recobrimento menor a agressividade do rebolo. Segundo Graf (2004) podem ser determinados intervalos de valores de grau de recobrimento para cada operação que se deseja executar, sendo elas:

- Desbaste: 2-3
- Retificação normal: 3-4
- Acabamento fino: 4-6
- Acabamento extra-fino: 6-8

No caso de rebolos superabrasivos, sabe-se que estes apresentam uma pequena camada de grãos aderida à superfície. Logo, o avivamento pode ser feito pressionando-se contra o rebolo uma barra de óxido de alumínio, ou ainda submetendo-se o rebolo a condições severas de trabalho (BIANCHI, 1992).

No que diz respeito à vida dos rebolos, Bianchi (1990) determinou alguns critérios para definir o fim da vida da ferramenta, sendo eles:

- Aumento excessivo da força de corte, devido ao desgaste dos grãos abrasivos ampliando o número de áreas planas na superfície do rebolo. Este fato é agravado pela acomodação dos cavacos nas porosidades da ferramenta ocasionando um “empastamento”. O aumento da força de corte resulta em esforços adicionais do sistema que podem culminar em defeitos e panes;
- Perda da integridade superficial da peça. O desgaste dos grãos é responsável por aumentar os valores das forças de atrito responsáveis por elevar a temperatura na região de corte. Caso esta temperatura não seja eficientemente dissipada pode proporcionar elevação dos níveis de tensões residuais, trincas e perdas das características mecânicas. O empastamento e a perda de agressividade (ausência de macro e microefeito) são responsáveis também por aumentar os índices de rugosidade;
- Erros de forma. O aumento de temperatura na região de corte é responsável também pela ocorrência de deformações heterogêneas na peça, devido a variações microestruturais e de composição. Estas deformações, por sua vez, geram variações na profundidade de corte. Este fenômeno ocorre normalmente quando da utilização de rebolos duros. Além disso, o desgaste desigual do material abrasivo é outro fator gerador de erros de forma. Tal ocorrência é característica de rebolos moles;
- Vibração. A vibração do sistema máquina-ferramenta-peça está associada principalmente a fenômenos de auto-excitação. Um rebolo desgastado ou empastado heterogeneamente, mesmo trabalhando a uma rotação constante, provoca alterações na força de corte, tornando-a

oscilante. Tais oscilações resultam num acréscimo de rugosidade, ultrapassando os limites aceitáveis para o processo de retificação.

2.3 Fluidos de corte

Nesta etapa serão abordadas as principais funções, características, desempenho e formas de manutenção e descarte dos fluidos de corte empregados nos processos de usinagem.

2.3.1 A importância da utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem

A aplicação de fluidos de corte nos processos de usinagem, quando feita de modo adequado, é responsável por aumentar a produtividade e reduzir custos, tornando possível a utilização de velocidades de corte mais altas com maiores taxas de remoção e profundidades de corte. Além disso, a correta aplicação de fluidos de corte evita a ocorrência de grandes desgastes da ferramenta, reduz os valores de rugosidade e os níveis de energia consumida (EL BARADIE, 1996; RAMOS et al., 2003).

Machado & Diniz (2000) relatam que em 1883, F. W. Taylor foi um dos pioneiros a verificar o bom desempenho do processo de corte de metais quando auxiliado por fluidos de corte. Este pesquisador demonstrou que a aplicação de um jato de água direcionado à zona de corte permitia aumentar a velocidade de corte em até 40%. A partir de então vários pesquisadores passaram a estudar o assunto, desenvolvendo, principalmente nas últimas décadas, uma infinidade de tipos de fluidos de corte.

A utilização deste tipo de produto ganhou força, sendo amplamente empregados na atualidade. De acordo com Heisel et al. (1998) nos primeiros onze meses de 1992 utilizou-se na Alemanha cerca de 79.000t de lubrificantes para refrigeração de trabalhos em metal. Cinco anos mais tarde, em 1997, Novaski & Dörr (1999) verificaram que a Alemanha já consumia 800.000t de lubrificantes destinados ao mesmo fim, conforme apresentado no gráfico abaixo.

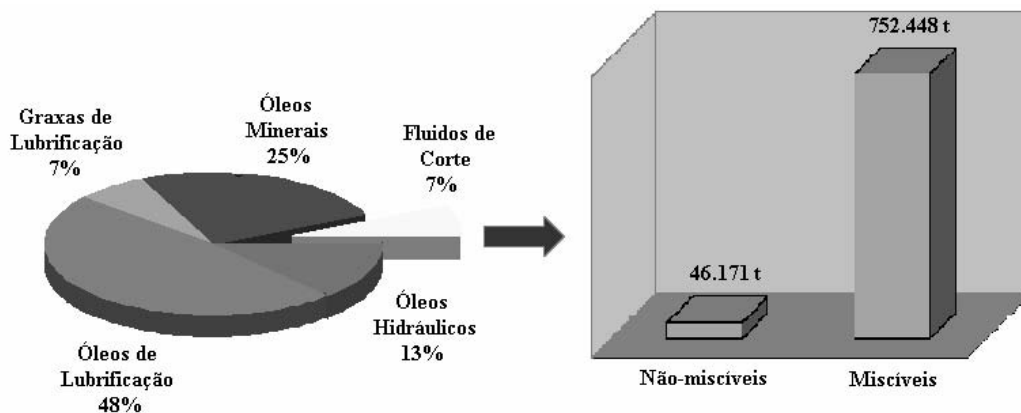


Figura 2.5 – Quantidade de fluidos de corte consumida na Alemanha em 1997, comparada ao consumo de outros óleos (NOSVASKI & DÖRR, 1999 adaptada).

No entanto, de acordo com Sreejiith & Ngoi (2000) muitas indústrias aplicam fluidos de corte em abundância quando seu uso nem se quer se faz necessário. Tal medida deve ser evitada, pois segundo estes autores o custo dos fluidos de corte pode chegar a 20% do custo total do processo de usinagem.

Na figura 2.6 é apresentada a distribuição dos custos intrínsecos a refrigeração.

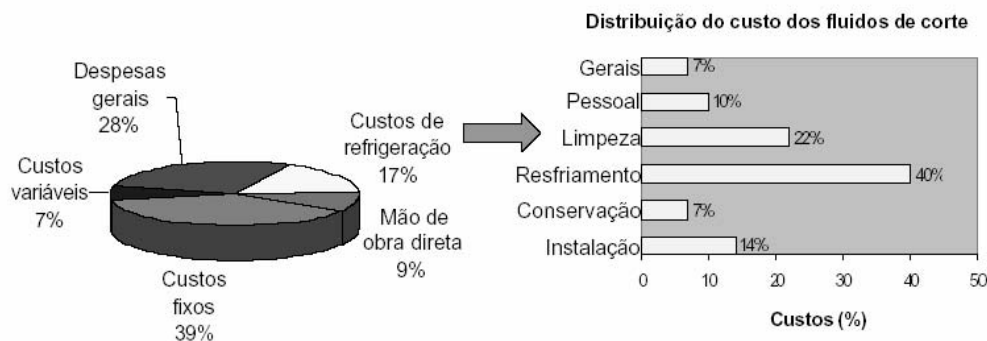


Figura 2.6– Custos médios de fabricação com detalhamento dos custos associados à refrigeração (NOSVASKI & DÖRR, 1999 adaptada por CATAI, 2004).

Por outro lado, o grande número de efeitos negativos ocasionados pelos fluidos de corte ao homem e ao meio ambiente, tem feito com as indústrias dispensem especial atenção no que diz respeito à seleção correta de fluidos de corte, os quais além de eficazes devem ser ecologicamente corretos. Deste modo, além de preencherem os

requisitos tribológicos, os novos fluidos de corte devem estar em conformidade com os padrões de proteção ambiental ditados por normas e certificações internacionais tais como a ISO 14000. Neste contexto, fabricantes e consumidores devem se unir no desenvolvimento de produtos de qualidade que atendam os parâmetros de usinagem e também parâmetros ecológicos (SOKOVIĆ & MIJANOVIĆ, 2001).

A contaminação do solo, água e ar é decorrente, segundo Klocke et al. (2000) de vazamentos, perdas, emissões, água da lavagem de reservatórios e da própria disposição dos fluidos de corte. Além disso, a grande quantidade de fluido de corte em reservatórios permite a proliferação de microorganismos vivos. A erradicação de tais elementos, os quais são responsáveis por degradar as propriedades dos fluidos, se dá por meio da adição de bactericidas e fungicidas. No entanto, estes compostos combinam-se com o fluido, gerando substâncias altamente tóxicas causadoras de doenças aos trabalhadores.

2.3.2 Classificação dos fluidos de corte

As indústrias mecânicas têm a sua disposição atualmente uma grande quantidade de fluidos de corte, elaborados a fim de satisfazer os modernos modelos de máquinas operatrizes. No entanto, fabricantes de fluidos não são capazes de criar um fluido de corte que reúna todos os diferentes requisitos exigidos para cada uma das diversas operações de usinagem conhecidas atualmente. Todavia, nos últimos anos, passou-se a produzir fluidos mais versáteis, que podem ser aplicados em diferentes tipos de operações de usinagem (torneamento, retificação, furação etc), com diferentes taxas de diluição, enquanto outros são desenvolvidos especificamente para um determinado tipo de operação, aliado ao grau de severidade da mesma (CATAI, 2004).

Segundo Motta & Machado (1995) cada fluido de corte possui características particulares, vantagens e limitações distintas. Por meio da distinção destas características é possível fazer uma classificação dos diversos tipos de fluidos de corte.

Runge & Duarte (1990) e Motta & Machado (1995) agrupam os fluidos de corte em quatro tipos básicos, sendo eles:

- Óleos de corte ou fluidos de corte (integral ou aditivado);
- Fluidos de corte solúveis em água:

- Emulsionáveis convencionais (óleos solúveis ou emulsionáveis);
- Emulsionáveis semi-sintéticos;
- Soluções (fluidos sintéticos);
- Gases;
- Pastas e lubrificantes sólidos;

2.3.2.1 Óleos de Corte

Nesta categoria, segundo Novaski & Rios (2004), podem ser inclusos todos os compostos capazes de formar películas oleosas, lubrificantes e aderentes. Normalmente tais compostos são de origem mineral, vegetal ou sintético. Estas substâncias podem ser utilizadas no estado puro, ou seja, na forma fornecida pelo fabricante, ou ainda aditivado com aditivos polares e/ou aditivos químicos ativos ou inativos.

Os aditivos são responsáveis por melhorarem a viscosidade, reduzir as espumas e proteger contra corrosão e oxidação. No entanto, mesmo aditivados os óleos integrais são extremamente aderentes, dificultando sua retirada da peça, o que na maioria das vezes resulta em mais operações e conseqüentemente, em custos adicionais de produção (NOVASKI & RIOS, 2004).

Segundo Webster (1995) os óleos integrais apresentam atualmente, em sua grande maioria, base parafínica substituindo os compostos aromáticos policíclicos, pois se estes últimos não forem destruídos durante o processo de formação do óleo de corte através de forte hidrogenação, podem causar câncer e dermatites.

Silva (2000) afirma que os óleos integrais têm excelentes propriedades lubrificantes, bom controle anti-ferrugem, longa vida útil; porém, apresentam menor poder refrigerante quando comparados com os fluidos de corte solúveis em água.

Os óleos vegetais e animais tiveram seu emprego reduzido, devido à dificuldade de obtenção e custos elevados e principalmente, ao excelente desempenho alcançado pelas modernas misturas a base de óleo mineral (EL BARADIE, 1996).

2.3.2.2 Fluidos solúveis em água

Os fluidos de corte solúveis em água transformam-se em misturas, segundo Silva (2000) quando se dilui o concentrado em água. Estas misturas variam entre emulsões e soluções dependendo da constituição básica do fluido de corte solúvel concentrado (óleo mineral ou sais orgânicos e inorgânicos, respectivamente), da presença e da quantidade de emulgadores no concentrado.

Dependendo da taxa de diluição e da constituição do concentrado do fluido solúvel, o fluido de corte pode apresentar uma refrigeração eficiente aliado a um moderado poder lubrificante, podendo então, ser empregado em operações de usinagem a alta velocidade, minimizando os efeitos negativos de origem térmica (EL BARADIE, 1996).

El Baradie (1996) classifica os fluidos solúveis em água da seguinte forma:

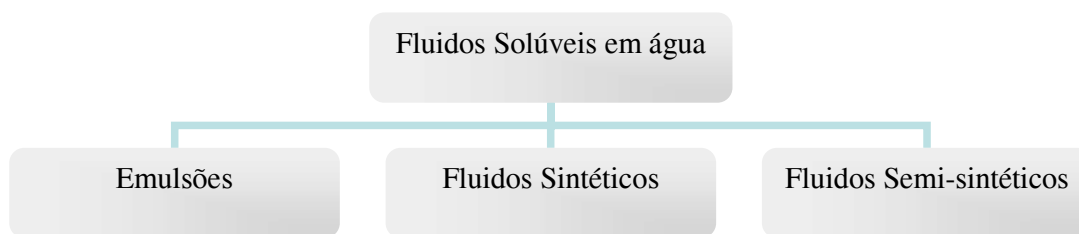


Figura 2.7 – Classificação dos fluidos solúveis em água (EL BARADIE, 1996, adaptado).

2.3.2.2.1 As emulsões

Qualquer que seja a origem do óleo, este sempre terá uma natureza apolar, enquanto a água tem natureza fortemente polar, fazendo com que a mistura de estes componentes não ocorra sem a adição de agentes emulsificantes, os quais permitem que pequenas gotas de óleo fiquem uniformemente dispersas em água, formando então, uma emulsão estável. Os emulgadores agem, conforme esquematizado na figura 2.8, “quebrando” o óleo mineral em minúsculas partículas conferindo-as cargas repulsivas, impossibilitando uma nova união das mesmas (coalescência). A quantidade de óleo e emulsificadores na solução varia entre 1 e 20%. Emulsões mais diluídas têm a função de reduzir os efeitos negativos da água, como, por exemplo, o elevado poder de corrosão (NOVASKI & RIOS, 2004).

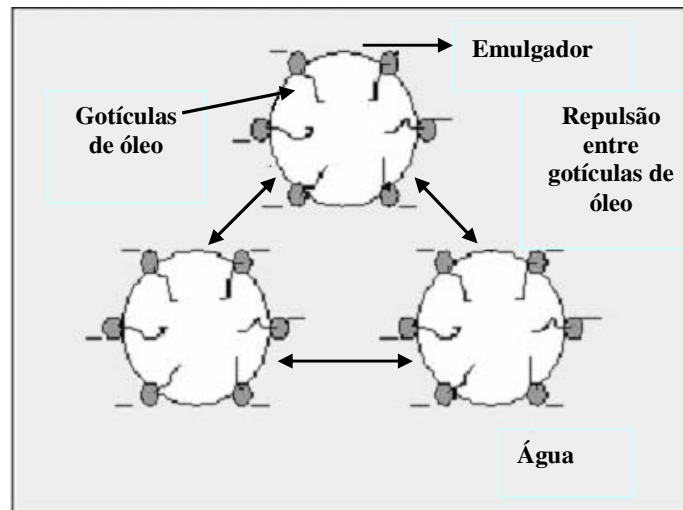


Figura 2.8 – Esquematização da ação de emulgadores em uma emulsão (Runge & Duarte, 1990).

El Baradie (1996) observa que as emulsões possuem elevada condutibilidade térmica e elevado calor específico, proporcionando uma refrigeração bastante eficaz. Todavia, os fluidos a base de água são fracos lubrificantes, ou seja, não possuem as propriedades necessárias para reduzir o atrito entre peça e ferramenta.

Um grande problema relacionado às emulsões está relacionado à estabilidade biológica, pelo fato de que os agentes emulgadores transformam-se em fonte de alimento para bactérias aeróbias e anaeróbias, as quais em grande quantidade degradam o fluido, destruindo suas propriedades de refrigeração e lubrificação, tornando-o inutilizável. (NOVASKI & RIOS, 2004).

2.3.2.2 Fluidos sintéticos

Os fluidos sintéticos são soluções químicas, constituídas de materiais (sais) orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água, não contendo óleo mineral. Em geral, estas substâncias permitem rápida dissipação de calor, bom controle dimensional, excelentes poder detergente e visibilidade da região de corte, facilidade no preparo da solução e elevada resistência a oxidação do fluido e a ferrugem. Sua utilização vem crescendo em função do custo elevado dos fluidos de corte integrais, devido às dificuldades de descarte e das restrições atuais quanto a sua utilização. Os fluidos sintéticos apresentam elevada estabilidade microbiológica, não necessitando ser periodicamente descartado devido ao ataque de bactérias. Esta característica proporciona uma redução de até 80%

de tempo de máquina parada para limpeza e reabastecimento do reservatório (NOVASKI & RIOS, 2004).

As desvantagens da utilização desta categoria de fluidos estão relacionadas ao baixo poder lubrificante, a formação de compostos insolúveis e de espuma para determinadas operações de usinagem.

2.3.2.2.3 Fluidos semi-sintéticos

Este tipo de fluido é uma combinação de fluidos sintéticos e emulsões de óleo em água. Atualmente, estes fluidos são compostos majoritariamente por compostos sintéticos, complementados por óleos emulsionáveis numa proporção que varia entre 5 e 30% do total do fluido. Desta forma é possível obter-se uma emulsão translúcida, composta por minúsculas partículas de óleo (EL BARADIE, 1996; NOVASKI & RIOS, 2004).

Esta categoria de fluidos combina características dos fluidos sintéticos e das emulsões, visando obter um desempenho mais eficiente que as próprias emulsões, principalmente no que diz respeito a um melhor controle de oxidação e melhor estabilidade microbiológica, mantendo uma boa capacidade de lubrificação com menores quantidades de óleos.

A Tabela 2.1 elaborada por Webster (1995) relaciona algumas características fundamentais dos fluidos de corte descritos acima.

Tabela 2.1 – Caracterização dos fluidos de corte (WEBSTER, 1995)

	Óleo Integral	Emulsões	Sintéticos	Semi-sintéticos
Remoção de calor	1	2	4	3
Lubrificação	4	3	1	2
Manutenção	4	1	3	2
Filtrabilidade	1	2	4	3
Danos ambientais	1	2	4	3
Custo	1	2	4	3
Vida do rebolo	4	3	1	2

Legenda: 1- ruim, 2- bom, 3- ótimo, 4- excelente

2.3.2.3 Gases e lubrificantes sólidos

De acordo com Silva (2000) o ar é o fluido gasoso mais comum. Gases como o argônio, hélio e nitrogênio são utilizados, em alguns casos, para prevenir a oxidação da peça e dos cavacos. Já o CO₂ (dióxido de carbono) que possui ponto de ebulição abaixo da temperatura ambiente, pode ser comprimido e injetado na região de corte promovendo sua refrigeração. Porém, grandes gradientes térmicos devem ser evitados, impedindo distorções das peças, surgimentos de tensões residuais. Novas pesquisas têm sido realizadas visando adequar a possibilidade da real utilização de gases lubrificantes em larga escala, atendendo os padrões de qualidade e produtividade para as peças usinadas. Silva (2000) relata que os lubrificantes sólidos mais utilizados para operações de elevada severidade são a grafite, o bissulfeto de molibdênio, alguns tipos de pastas, sabões e ceras. No entanto, no processo de retificação a aplicação destes produtos é limitada pelo fato destes impregnarem na superfície do rebolo, inibindo a ação de corte da ferramenta.

2.3.3 Funções dos fluidos de corte no processo de retificação

Segundo El Baradie (1996), a seleção e aplicação dos fluidos de corte empregados nos processos de usinagem não são feitas baseando-se em critérios técnicos, visando o melhor desempenho possível. No entanto, o conhecimento preciso dos métodos de lubri-refrigeração se faz necessário, pois quando adequadamente aplicados, os fluidos de corte podem aumentar a produtividade e reduzir custos por meio da utilização de altas velocidades de corte e elevadas taxas de avanço. Além disso, uma aplicação eficaz aumenta a vida da ferramenta, diminui os valores de rugosidade superficial, amplia a precisão geométrica e reduz a potência consumida pela máquina.

De acordo com Sales et al. (1999), Ebbrell et al. (1999) e Hryniewicz et al. (2000), Novaski & Rios (2004) os fluidos de cortes têm três funções básicas e fundamentais quando aplicados ao processo de retificação:

Resfriar o conjunto peça-rebolo. O processo de formação de cavaco no processo de retificação se dá através da ação de inúmeras arestas de corte distribuídas e orientadas na estrutura do rebolo de forma aleatória. Segundo Kovacevic & Mohan (1995) apud Silva (2000), esta remoção é acompanhada de um elevado consumo de energia. Durante as etapas de formação do cavaco (atrito, deformação plástica e lascamento), grande parte da energia gerada é convertida em calor elevando as temperaturas na região de corte. Se esta temperatura não for mantida dentro de níveis aceitáveis verifica-se uma solitação térmica da peça, podendo levar até ao comprometimento da integridade superficial da mesma, através do surgimento de fissuras, distorções, tensões residuais elevadas e não-conformidades dimensionais; lavar a zona de retificação retirando os cavacos alojados nos poros do rebolo evitando, desta forma, o entupimento dos mesmos; lubrificar a região de contato peça-ferramenta, reduzindo a intensidade das forças envolvidas no processo e a geração de calor, por meio principalmente, da minimização dos efeitos tribológicos, oriundos do contato peça-rebolo; proteger contra corrosão.

Malkin (1989) afirma que além de garantir uma refrigeração eficaz da zona de contato entre peça e ferramenta, o fluido de corte deve atuar no mecanismo de formação de cavaco, favorecendo o corte (*chip formation*) e inibindo a ocorrência de deformações plásticas sem remoção de material (*plowing*), reduzindo o montante de energia

específica de retificação envolvida no processo. Hitchiner (1990) apud Silva (2000) relata que o *plowing* pode ser evitado mantendo-se o rebolo afiado, diminuindo, deste modo, o coeficiente de atrito atuante entre peça e ferramenta e a intensidade das forças de retificação para uma determinada taxa de remoção de material.

2.3.4 Aspectos que afetam a estabilidade dos fluidos de corte aplicados no processo de retificação

2.3.4.1 Acidez ou alcalinidade

A acidez ou alcalinidade de uma solução aquosa é medida pelo seu pH, o qual no caso de emulsões recém preparadas, tende a diminuir rapidamente nas primeiras horas de uso pela absorção de CO₂ da atmosfera, formando ácido carbônico. A redução típica do pH é em torno de 0,5 (RUNGE & DUARTE, 1990).

De acordo com El Baradie (1996), a pele humana normalmente tem um valor de pH entre 5,5 e 5,6. Soluções com índices de pH diferente destes valores podem causar irritações na pele de diferentes intensidades dependendo da pessoa. Se o valor do pH cair abaixo de 8,5, a probabilidade de se aumentar a oxidação é grande. Porém se este valor exceder 9,3 o perigo de irritação na pele aumenta ainda mais. O pH ideal para uma emulsão é de 9 a 9,3, porém na prática o valor normalmente utilizado está entre 8,5 e 9,3. Em locais de temperatura elevada é aconselhável a utilização de valores de pH superiores aos ideais, pois nestas condições verifica-se uma tendência ao crescimento de colônias bactérias, as quais sintomaticamente tendem a diminuir o pH.

Desta forma, além de servir como referência para a determinação da acidez ou alcalinidade das soluções, o pH é um parâmetro capaz de determinar o nível de ataque bacteriano, sendo então de extrema importância mantê-lo sob inspeção diária (RUNGE & DUARTE, 1990, SHELL).

2.3.4.2 Concentração

A concentração é outro importante parâmetro associado ao desempenho dos fluidos de corte. O valor ideal de concentração é fornecido pelo fabricante do produto,

dependendo sempre da aplicação a qual a emulsão será destinada. É importante salientar que o limite inferior não deve ser ultrapassado, pois este limite refere-se à mínima concentração em que o fluido mantém suas propriedades lubrificantes e anticorrosivas. Esta concentração é dada em termos da proporção entre a quantidade de fluido de corte solúvel concentrado e a quantidade de água a ser adicionada, definido como taxa de diluição (RUNGE & DUARTE, 1990).

2.3.4.3 Qualidade da água

Baradie (1996) relata que normalmente a água das principais cidades é satisfatória para a preparação dos fluidos de corte a base de água, no entanto, é sempre desejável que o laboratório determine a quantidade de ácidos orgânicos e minerais presentes na água, bem como a sua dureza, definida em função dos sais dissolvidos na mesma, sendo os principais deles cálcio, magnésio e ferro. De acordo com Runge & Duarte (1990) a utilização de água dura é responsável por elevar rapidamente a concentração de ânions e cátions, já a partir do momento que é reposta no reservatório, visando recuperar a perda por evaporação. Os elementos presentes na água dura reagem com sabões, agentes umectantes e emulgadores para formar compostos insolúveis, reduzindo a reserva de inibidores de corrosão e biocidas, obstruindo as tubulações e formando depósitos aderentes na máquina operatriz. Portanto, se a dureza da água for excessivamente elevada, deve-se fazer um pré-tratamento da mesma, abrandando tal dureza por deionização ou por osmose reversa.

2.3.5 Controle microbiológico de emulsões

De acordo com Runge & Duarte (1990), as emulsões podem sofrer diversos tipos de contaminações:

- Por bactérias, que podem resultar na redução do pH, irritação na pele, corrosão, mau cheiro, quebra da emulsão etc.
- Por fungos, resultando no aparecimento de camadas sobrenadantes de óleo, entupimento de filtros e tubulações.

- Por líquidos estranhos, os quais além de gerar as conseqüências apontadas acima para os microorganismos, resulta em maiores desgastes das ferramentas, entupimento dos filtros e névoa de óleo.

Segundo Runge & Duarte (1990) dentre os diversos tipos de contaminação citados acima o ataque bacteriano é o principal responsável pelo descarte prematuro de uma emulsão. Isto se dá porque as bactérias usualmente precisam de água para crescer e se proliferar e sua entrada nos reservatórios se dá facilmente por meio da água usada na emulsão, do ar, do contato com as mãos dos operadores e dos elementos da máquina. Quando já alojadas nos fluidos, as bactérias multiplicam-se, dividindo-se em duas a cada 20 ou 30 minutos, tornando o crescimento bacteriano elevadíssimo (SILLIMAN, 1992 apud Catai, 2004).

Runge & Duarte (1990) afirmam que a obtenção de uma emulsão estéril é praticamente impossível. Logo, a solução viável para o problema é o monitoramento do número de bactérias, o qual pode ser feito por meio dos seguintes métodos:

- biocidas (eficientes e amplamente utilizados);
- radiação gama (eficiente, porém requer cuidados especiais durante a aplicação);
- pasteurização (custo elevado);
- microondas (bastante efetivas).

Segundo Sales (1999) os biocidas são definidos como substâncias ou misturas químicas que inibem o desenvolvimento de microorganismos. A adição de biocidas não deve ser realizada somente quando for detectada sua degradação (deterioração), pois isso acarretará na diminuição da proteção anticorrosiva. O pH será diminuído a níveis inadequados sendo necessário à adição de materiais que o elevem. Além disso será necessário adicionar materiais anticorrosivos, resultando em emulsões de baixa qualidade (apenas aceitáveis).

De acordo com Runge & Duarte (1990), os biocidas são usados principalmente em soluções e emulsões contribuindo para a conservação destas. Algumas vezes são usados também em fluidos de corte integrais. Desta forma, os conservantes podem ser definidos como substâncias ou misturas químicas, que usadas em baixas concentrações (usualmente entre 0,1 e 5000mg/ml) eliminam microrganismos ou inibem o seu desenvolvimento. Os biocidas devem possuir as seguintes características: largo espectro

antimicrobiano, ação biocida rápida, tolerância à presença de materiais orgânicos e inorgânicos, elevada estabilidade térmica, boa compatibilidade com outros materiais, nenhuma influência nas propriedades refrigerantes e lubrificantes dos fluidos de corte, baixa influência sobre o pH, solubilidade no fluido de corte concentrado, odor aceitável, compatibilidade com a pele humana, degradabilidade biológica e economia.

2.3.6 Manutenção dos fluidos de corte

De acordo com Bienkowski (1993) apud Silva (1999), uma boa manutenção dos fluidos de corte compreende a observação das alterações que ocorrem no sistema de refrigeração, visando encontrar marcas que evidenciem a deterioração do mesmo e também procedimentos periódicos de manutenção, tais como medição do pH, da concentração e contagem de microorganismos. Segundo o autor, qualquer programa de manutenção deve começar pela limpeza da retificadora, das tubulações por onde circulam o fluido e do reservatório. Uma limpeza irregular permite que bactérias fiquem alojadas em cantos vivos e nas tubulações, atacando imediatamente a nova carga de fluido, deteriorando-o prematuramente.

2.3.7 Procedimentos adotados para descarte dos fluidos de corte

A fim de satisfazer leis governamentais e locais no que diz respeito a poluição da água, todo fluido de corte solúvel em água deveria sofrer uma espécie de tratamento antes de ser expelido em rios, córregos ou ainda no sistema de esgoto, pois os elementos químicos contidos nestes fluidos, tais como óleos nitritos, fenóis, fosfatos e metais pesados são extremamente poluentes. O conteúdo dos óleos de corte podem ser quebrados ou separados da emulsão por um tratamento de ácido ou sulfato de alumínio (EL BARADIE, 1996).

Diante de tais fatos, verifica-se segundo Silliman (1992) apud Catai (2003) que o método mais adequado de descartar o fluido de corte é fazendo-se a reciclagem do mesmo. Este processo consiste em remover o refrigerante usado da máquina, separando os resíduos por meio de uma filtragem. O refrigerante limpo é então adicionado ao reciclado e a nova mistura volta para dentro da máquina. Este processo de reciclagem

elimina a frequência com que o refrigerante é descartado, gerando significativa economia financeira já que os custos associados ao descarte são bastante elevados.

Na figura 2.9 é apresentada uma esquematização da correta disposição dos fluidos de corte:

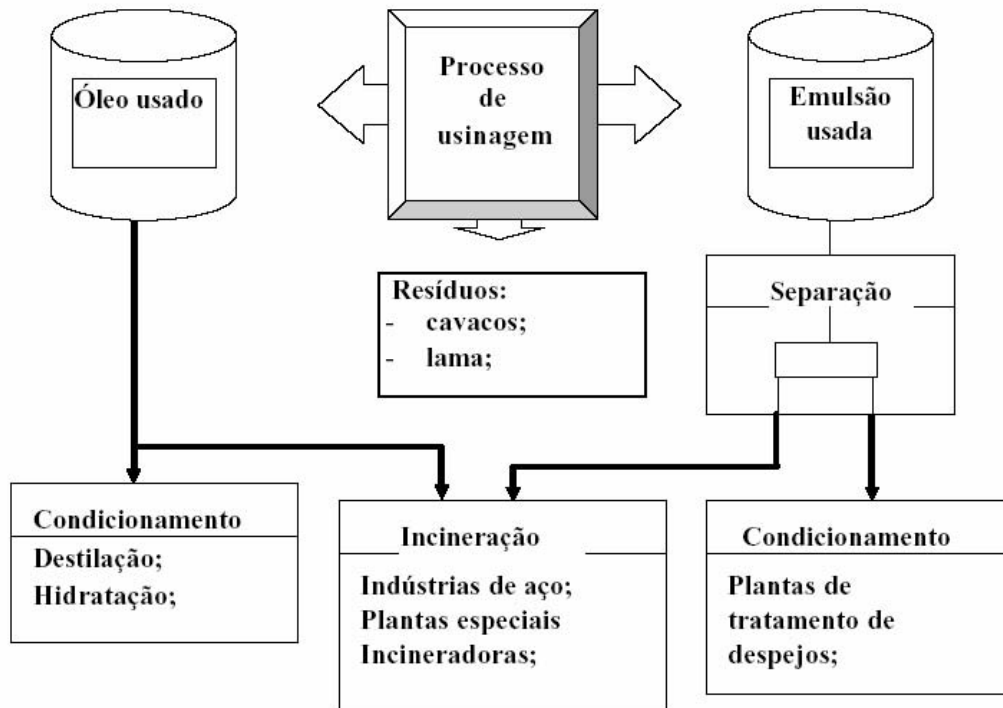


Figura 2.9– Esquematização do processo de disposição de fluidos usados (SOKOVIC & MIJANOVIC, 2001).

As alternativas tecnológicas para a diminuição dos problemas ambientais podem abranger o uso de novos materiais, o emprego de processos otimizados de fabricação, aumento do tempo de vida e/ou aumento da possibilidade de reconstituição do fluido, processos de filtragem ou ainda a utilização de novos métodos de lubri-refrigeração, tal como o de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL), que está sendo avaliado neste trabalho (BARADIE, 1996; RAMOS et al., 2003).

2.4 A importância da aplicação de fluido de corte no processo de retificação

De acordo com Ramesh et al. (2001) a alta eficácia alcançada nos últimos tempos pelo processo de retificação permite que se utilize taxas de remoção de material cada vez maiores, graças a utilização de rebolos com maiores diâmetros ou maiores velocidades de corte. Por outro lado, as elevadas velocidades de corte criam uma barreira de ar ao redor do rebolo, dificultando que o fluxo de fluido de corte alcance a região de corte. No entanto tal dificuldade deve ser superada de alguma forma pois Campbell (1995) afirma que a aplicação correta de fluido no processo de retificação é imprescindível para a obtenção de êxito técnico e econômico na operação desenvolvida. Segundo o mesmo autor, usualmente a importância dos métodos de aplicação de fluido de corte é subestimada. Talvez porque não se tenha um método eficaz de mensurar o efeito dos variados parâmetros envolvidos na aplicação.

Satow (1986), Campbell (1995), Webster et al. (1995) e Ramesh et al. (2001) realizaram diversos estudos definindo parâmetros adequados que viabilizassem um método de lubri-refrigeração a alta pressão capaz de suprir a barreira de ar formada em torno do rebolo. Na figura 2.10, Campbell (1995) apresenta os principais fatores associados a aplicação de fluido de corte.

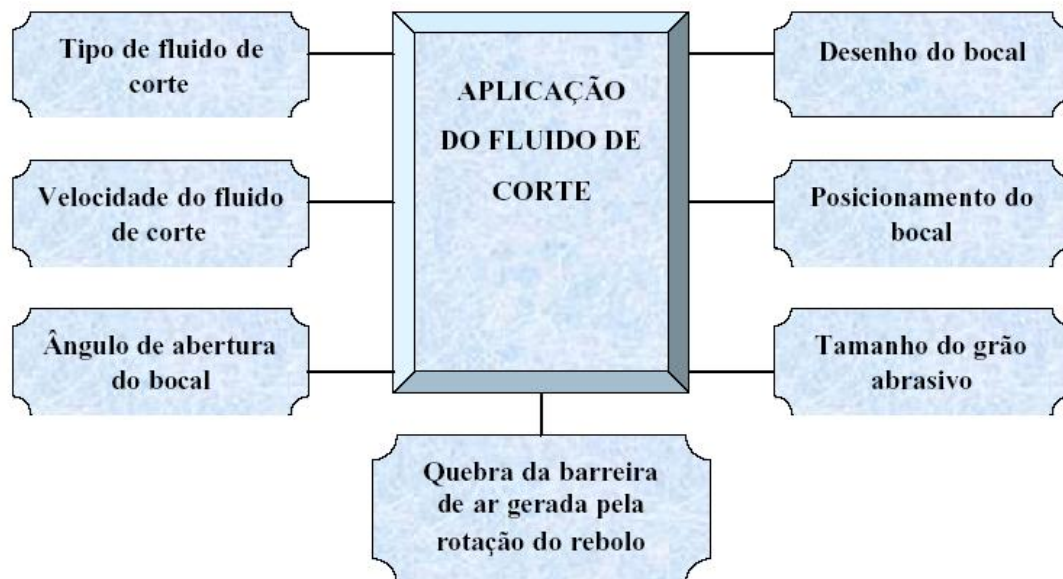


Figura 2.10 – Fatores que afetam a aplicação do fluido (CAMPBELL, 1995 - adaptada).

A seguir, visando otimizar o processo e tornar a retificação mais eficiente, apresentam-se alguns tipos diferenciados de bocais para aplicação de fluido de corte e ainda diferentes modelos de posicionamentos dos mesmos, além de serem apresentados alguns sistemas de defletores e placas defletoras que facilitam ao fluido chegar com menor dispersão na região da interface metal/rebolo.

2.4.1 Posicionamento do bocal

A aplicação correta do fluido na interface de contato peça-rebolo, principalmente quando se diz respeito à operação de retificação cilíndrica interna, é algo muito difícil de ser realizado. Vários métodos e estudos foram realizados sobre a grande problemática envolvendo os parâmetros, acessórios e processos ideais, objetivando promover a melhor lubrificação possível da peça e assim evitar a ocorrência de danos térmicos e dimensionais que impeçam a obtenção dos padrões de qualidade desejados (CAMPBELL, 1995). Logo, constata-se que a qualidade final do produto produzido é resultado do emprego de um método de aplicação de fluidos otimizado, associado à utilização dos rebolos, fluidos e máquinas retificadoras específicos para cada operação. Assim será possível aumentar a capacidade de lubrificação e refrigeração na região de corte, além de facilitar, em função do tipo e do posicionamento do bocal, a expulsão dos cavacos (EBBRELL et al., 1999).

O efeito do posicionamento do bocal com relação à peça e à ferramenta pode ser visualizado na figura 2.11, levando-se em consideração a rugosidade média aritmética (R_a) da peça retificada. Verifica-se que a aplicação tangencial de fluido implica em uma maior rugosidade na peça, devido principalmente a não lubri-refrigeração efetiva dos grãos abrasivos da ferramenta. Os menores valores de rugosidades foram obtidos para a posição angular do bocal, na qual o efeito conjugado lubri-refrigeração foi de maior eficiência, ocasionando menores danos e solicitações térmicas.

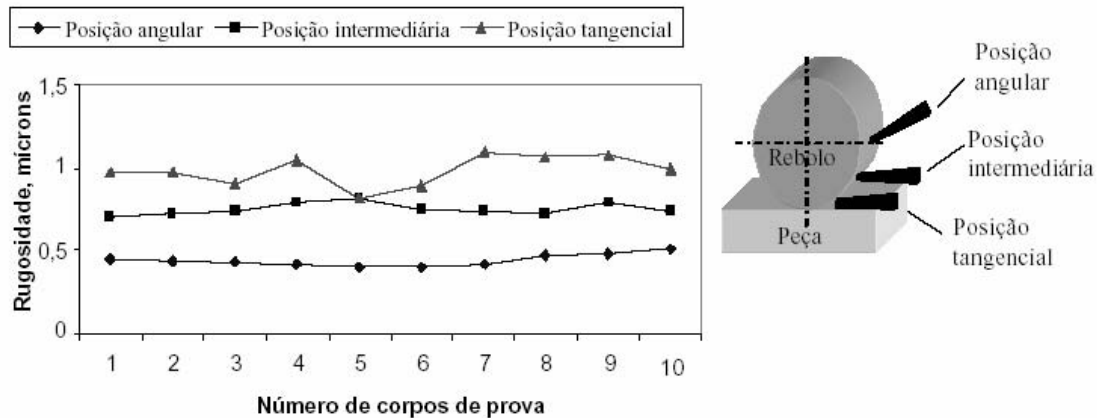


Figura 2.11 - Rugosidade média do corpo de prova em função do posicionamento do bocal (EBBRELL et al., 1999).

2.4.2 Utilização de bicos otimizados arredondados

A utilização de bicos convencionais tem-se tornado inadequada devido ao crescimento na utilização de fluidos a base de água (com reduzida densidade) os quais apresentam grande dispersão e se perdem na região de corte, devido à barreira de ar gerada em torno do rebolo, em função da elevada rotação. Uma maneira de eliminar tal barreira se dá adotando-se a velocidade de saída do jato igual à velocidade periférica do rebolo. No entanto, alguns bocais convencionais apresentam um desenho do orifício de saída desfavorável, necessitando de um aumento da pressão da bomba para proporcionar uma velocidade de saída do fluido adequada, o que por outro lado conduz a um aumento da dispersão do jato, diminuindo a eficiência do mesmo. De acordo com Webster (1999) o aproveitamento do aumento da pressão da bomba, sem prejudicar a coerência do jato de fluido de corte, pode ser conseguido utilizando-se bocais com formatos otimizados.

A figura 2.12 apresenta um bico tradicional, caracterizado por uma ou duas paredes convexas, as quais causam a separação do fluxo do fluido na saída. Isto porque tais paredes provocam um escoamento turbulento de fluido, utilizado para baixas pressões de aplicação, o que dificulta a coerência do jato (WEBSTER et al., 1995).

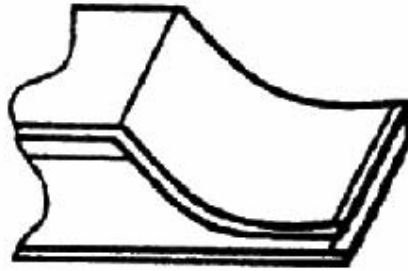


Figura 2.12 – Bocal tradicional (WEBSTER et al., 1995).

Desta forma, o fluxo adequado de fluido à região de corte pode ser conseguido por meio do desenvolvimento de bicos especiais. Segundo Webster et al. (1995), um bico ideal para retificar pequenas larguras de retificação, seria de formato arredondado com paredes internas côncavas, capazes de garantir uma maior coerência do jato. Na figura 2.13, D [mm] é o diâmetro interno da tubulação de alimentação do fluido e d [mm] é o diâmetro do orifício de saída de fluido. Nota-se que este bocal de formato arredondado por possuir superfícies côncavas, aproximam as lâminas de fluido que se formam durante o escoamento, minimizando a ocorrência da queda de pressão e turbulência ocasionada durante a passagem e saída do fluido de corte. Já nos bocais com superfície convexa, a tendência é de que as lâminas de fluido formadas no interior do mesmo se separem, aumentando o efeito de turbulência.

Razão de Contração = D/d

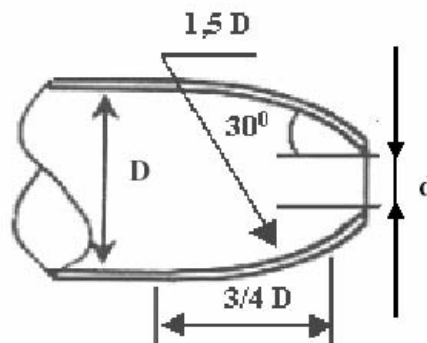


Figura 2.13 – Bico especial arredondado (WEBSTER et al., 1995).

Webster et al. (1995) avaliaram alguns parâmetros utilizando o bico arredondado, são eles:

- A temperatura na região de corte diminuiu em relação aos processos com bicos tradicionais;
- A velocidade periférica do rebolo em relação ao jato do fluido é muito significativa para a refrigeração da peça;
- A abertura geométrica dos bocais na entrada e saída, e as superfícies internas devem ser bem estudadas, pois apresentam grande importância, na tentativa de diminuir a turbulência do fluido de corte no interior do bico;
- Deve-se atribuir grande importância ao raio de contração, que expressa a razão entre os diâmetros de entrada e saída do bocal, sendo que tal razão apresenta de maneira significativa a possibilidade da ocorrência de turbulência no bocal.

Com relação ao raio de contração, pode-se afirmar que quanto maior, maior também será a velocidade do fluido de corte e, por consequência, maior será o número de Reynolds, refletindo uma região de intensa turbulência. No entanto, tal turbulência possibilita a ocorrência da relaminação durante a passagem do fluido pelo bocal, facilitando o escoamento. Logo, os melhores resultados são obtidos com maiores raios de contração.

2.4.3 Utilização de bicos especiais com uma envolvente ao redor do rebolo

Segundo Silliman (1992), os métodos convencionais de aplicação de fluidos de corte no processo não são completamente eficazes na remoção de calor na região de corte, pois os mesmos não alcançam efetivamente o local onde o calor é gerado. Isto porque a velocidade de corte elevada do rebolo, cria um filme de ar em sua volta, bloqueando a entrada do fluido. Para evitar tais problemas, pode-se utilizar bocais especiais capazes de recobrir o rebolo. Tais bicos, ilustrados na figura 2.14, devem ser ajustáveis a uma grande faixa de tamanho de rebolos, contanto que uma espécie de envolvente, a qual deve ser conjugada ao bico, também seja regulável.

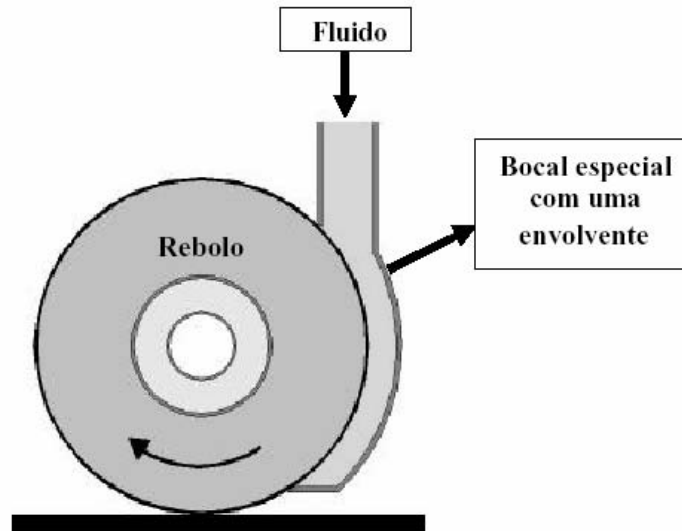


Figura 2.14 – Bico especial, com uma envolvente ao redor do rebolo (SILLIMAN, 1992).

2.4.4 Utilização de bicos ejetores com elementos condutores

Brinksmeier et al. (2001), apresentam um método otimizado de aplicação constituído de bicos injetores do tipo sapata, com elementos condutores, capazes de direcionar melhor o fluxo do fluido e melhorar o preenchimento dos poros do rebolo. Na figura 2.15, tem-se a esquematização de bicos ejetores com elementos condutores radiais, retos, tangenciais e sem os mesmos.

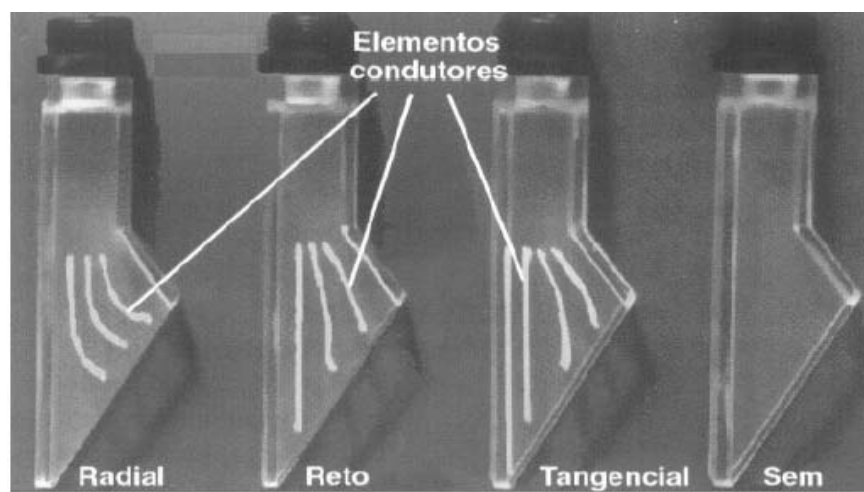


Figura 2.15 – Bicos ejetores (tipo sapata) com elementos condutores (BRINKSMEIER et al., 2001).

Para a obtenção de um processo ideal (otimizado) para estes bicos, é necessária uma combinação adequada da vazão do fluido e velocidade de corte, além é claro da utilização da forma correta de disposição dos elementos condutores no interior do bico, para se evitar a separação do fluxo.

2.4.5 Utilização de sapatas refrigerantes e defletores

Os defletores são placas alocadas próximas a superfície do rebolo com o intuito de eliminar a cortina de ar formada ao redor deste. Esta cortina dificulta e muitas vezes até evita a entrada de fluido de corte na zona de retificação. Para operações com a utilização de elevadas velocidades de corte, o efeito desta camada é ainda mais forte. A eliminação desta camada de ar é capaz de proporcionar redução de até 20% dos valores de rugosidade (RAMESH et al., 2001).

Verifica-se, no entanto, que na operação de retificação cilíndrica interna não há espaço físico que permita a alocação de tais defletores, impossibilitando seu uso.

2.5 A técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL)

Tawakoli (2003) afirma que a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) destaca-se atualmente como uma tendência dentre os métodos de lubri-refrigeração empregados nos processos de usinagem em geral. Tal técnica é responsável por trazer benefícios para as indústrias aumentando sua competitividade no mercado, além de satisfazê-las em aspectos ecológicos e econômicos, dispensando toda a salubridade e onerosidade envolvida com o descarte de fluidos convencionais.

Heisel et al. (1998) afirmam que a técnica de MQL é um elo de ligação entre os métodos de lubri-refrigeração convencionais e a usinagem a seco. Estudos envolvendo a usinagem a seco mostram que a ausência de lubrificante torna-se inviável quando se verifica a vida da ferramenta, os esforços da máquina e a qualidade superficial da peça retificada. A MQL caracteriza-se como uma alternativa interessante que combina a utilização de ar comprimido, responsável pela refrigeração, misturado a uma pequena

quantidade de óleo que lubrifica a interface de contato peça-ferramenta. Enquanto processos convencionais de lubrificação chegam a utilizar 45-50 litros de fluido por minutos, na MQL a vazão máxima de óleo não passa dos 100 mililitros por hora, ou seja, é reduzida em algo em torno de 27.000 vezes.

2.5.1 Fatores motivantes para utilização da MQL

A motivação para a utilização da MQL se concentra, dentre outras coisas, na eliminação de todos os problemas associados à utilização de fluidos convencionais, tais como:

- dermatites e dificuldades respiratórias que atingem os trabalhadores do meio;
- contaminação de solos e águas;
- necessidade de utilização de bactericidas e fungicidas que combinados a outros produtos durante a execução do processo, tornam-se extremamente tóxicos (KÖNIG, 1993 apud KLOCKE, 2000).

Além disso, verifica-se que os custos de operação dos métodos convencionais de lubri-refrigeração podem chegar, segundo Novaski & Dörr (1999), a 17% do custo total do processo, conforme Fig. 2.6, tornando evidente a necessidade de implementação de um novo modelo que torne o processo de produção o menos dispendioso possível, mas que ao mesmo tempo, garanta os excelentes níveis de qualidade que caracterizam o processo de retificação.

2.5.2 Definições da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação

De acordo com Klocke et al. (2000) é de extrema importância no processo de retificação a existência de um fluxo de fluido direcionado a região de contato entre peça e ferramenta, o qual contribui com a dissipação de calor e a remoção dos cavacos gerados desta região, facilitando a execução do corte.

Na MQL o elemento responsável pela refrigeração é o ar, o qual possui menor capacidade de refrigeração do que as emulsões, justamente pelo fato de apresentar menor capacidade térmica específica. Por este motivo são utilizados na MQL óleos com excelente capacidade de lubrificação, visando compensar o desempenho insuficiente do ar refrigerante.

Portanto, conforme Klocke et al. (2000), a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) pode ser entendida como uma pequena quantidade de óleo lubrificante misturada a um fluxo de ar comprimido, formando uma névoa a qual é aspergida na região de contato entre peça e ferramenta. Constatou-se, ainda segundo Klocke et al. (2000) que as boas propriedades lubrificantes do óleo empregado na MQL são responsáveis por reduzir o atrito minimizando desta forma, a taxa de calor gerado, mantendo a ferramenta dentro de uma faixa de temperaturas que não prejudiquem seu desempenho.

Heisel et al. (1998), Dörr (1999) apud Silva (2004) e Klocke et al. (2000) listam as vantagens da MQL em comparação a refrigeração convencional, sendo as principais delas:

- utilização de baixa quantidade de fluido de corte, dispensando a instalação de um sistema de circulação;
- materiais de filtragem e reciclagem dos lubrificantes podem ser evitados;
- os fluidos de corte consumidos no processo convencional aumentam a necessidade de manutenção e problemas de despejo e descarte;
- as peças obtidas no fim do processo se encontram quase secas, dispensando o processo de lavagem subsequente;
- o reduzido teor de óleo misturado aos cavacos não justifica a sua recuperação;
- a aplicação de biocidas, fungicidas e preservativos pode ser eliminada, já que a quantidade de óleo existente no reservatório é estimada para um turno de trabalho sendo, portanto, renovada constantemente impedindo que haja tempo para o ataque de bactérias.

Heisel (1998) observou também que a utilização da técnica de MQL impede o surgimento de gradientes térmicos. No caso de fluidos convencionais, o calor da superfície é retirado numa velocidade muito maior que em regiões mais próximas do

centro, pelo fato da região superficial ser inundada pelo fluido. Estes gradientes são responsáveis por ocasionar modificações microestruturais heterogêneas, resultando na formação de tensões internas que irão degradar as propriedades mecânicas do material.

No entanto, pode-se observar também algumas desvantagens da MQL frente à refrigeração convencional, como por exemplo, a necessidade de implantação de um sistema pneumático capaz de pressurizar o ar e outros equipamentos, tais como coifas e exaustores, responsáveis pela sucção de poluentes em suspensão no ar. Atenção especial deve ser dispensada também ao barulho gerado pelo fluxo de ar e pelo contato entre peça e ferramenta, que prejudica uma eventual comunicação durante a execução do processo (NOVASKY & DÖRR, 1999, KLOCKE et al., 2000).

Heisel et al. (1998) e Novasky & Dörr (1999) recomendam o uso de óleos de viscosidade elevada com aditivos anti-névoa, capazes de reduzir o número de partículas oleosas suspensas no ar atmosférico. Além disso, os óleos utilizados devem ser ‘ambientalmente corretos’, ou seja, isentos de solventes e de compostos que contenham flúor, mas que apresentem elevada capacidade de remoção de calor. Os óleos que melhor atendem tais requisitos são os de origem vegetal e por isso eles têm sido cada vez mais empregados.

2.5.3 Análise do desempenho da técnica de MQL na operação de retificação cilíndrica interna

Hafenbraedl & Malkin (2001) aplicaram a técnica de MQL no processo de retificação cilíndrica interna de mergulho. Esta operação é de difícil execução pelo fato da zona de retificação se localizar em uma região de acesso restrito, dificultando, desta forma, o posicionamento dos bocais de lubrificação e a remoção dos cavacos formados. Os corpos de prova foram feitos de aço AISI 52100 temperado, apresentando dureza média de 60 HRc. Utilizou-se como ferramenta abrasiva um rebolo convencional de Óxido de Alumínio (Al_2O_3). Os pesquisadores verificaram o excelente desempenho lubrificante da técnica de MQL apresentando resultados superiores aos do óleo solúvel convencional, utilizado como parâmetro de referência. Por meio deste trabalho observou-se que a utilização da técnica de MQL resultou em baixos valores de energia específica, reduziu a potência de retificação, conseguindo-se assim os menores valores

de rugosidade superficial e ainda uma redução significativa do desgaste do rebolo, verificado por meio da obtenção de uma relação G mais alta. Os pesquisadores observaram que a principal desvantagem da MQL refere-se ao resfriamento insuficiente da peça, causando dilatações térmicas e dificuldade com o controle dimensional. No entanto, tal problema pode ser amenizado utilizando-se uma ferramenta superabrasiva, como será feito neste trabalho, capaz de executar uma dissipação de calor muito mais eficaz.

Klocke et al. (2000) constataram uma certa ineficiência da técnica de MQL no que diz respeito à qualidade superficial da peça usinada, que segundo tais autores está associada principalmente a dificuldade na remoção de calor da zona de retificação.

Silva et al. (2004) empregam a técnica de MQL na operação de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 temperado e revenido. Utilizou-se como ferramenta abrasiva um rebolo convencional de Óxido de Alumínio (Al_2O_3) e um superabrasivo de CBN. Além da MQL, os pesquisadores empregaram o método de refrigeração convencional, caracterizado pela alta vazão e baixa pressão de aplicação, como meio de avaliar e comparar o desempenho de cada método de lubri-refrigeração.

O lubrificante utilizado no processo de MQL foi o LB 1000 da empresa ITW Chemical Products Ltda. As velocidades de aplicação do ar comprimido foram de 20, 30 ou 40m/s, visando aproximá-las da velocidade tangencial de corte do rebolo (30m/s). Para o lubrificante adotou-se as vazões de 40 ou 60ml/h, enquanto para o processo de refrigeração convencional utilizou-se uma emulsão semi-sintética com vazão de 8,4l/min. Empregou-se neste trabalho três etapas de 30 ciclos, sendo cada um deles de 100 μ m.

Silva et al. (2004) obtiveram resultados satisfatórios quando do emprego da técnica de MQL. Os valores de rugosidade (R_a) e do desgaste diametral do rebolo sofreram sensível queda, comprovando a excelente capacidade de lubrificação do óleo da MQL. Não obstante, observou-se também queda na força tangencial de corte e na energia específica quando comparados à condição convencional de lubri-refrigeração.

2.5.4 Classificação e Projeto de Sistemas de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL)

De acordo com Heisel et al. (1998) e Klocke et al. (2000) os sistemas de Mínima Quantidade de Lubrificação podem ser classificados de três formas distintas. A primeira delas consiste no sistema de pulverização de baixa pressão, em que o refrigerante é aspirado por uma corrente de ar e levado até a superfície. Estes sistemas apresentam um fluxo volumétrico de refrigerante entre 0,5 a 10l/h. O segundo modelo utiliza bombas dosadoras com alimentação pulsatória de uma quantidade definida de lubrificante até a superfície sem a presença de um fluxo de ar comprimido. Estes sistemas são utilizados em processos intermitentes, com taxas de fluxo definidas entre 0,1 e 1ml por ciclo, podendo atingir 260 ciclos por minuto. O terceiro e o mais empregado sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação é o de pressão, utilizado neste trabalho, em que o refrigerante é bombeado através de uma tubulação distinta da do ar comprimido. Somente no bocal este refrigerante é misturado ao fluxo de ar e, então direcionado a interface de contato peça-ferramenta. Este modelo é bastante interessante pelo fato de permitir um ajuste independente das vazões de ar e de lubrificante. O consumo de óleo neste método é reduzido, definido entre 10 e 100ml/h, já que o mesmo conta com o desempenho refrigerante do ar comprimido. Outro aspecto positivo deste sistema se concentra no fato da mistura coaxial de refrigerante e ar no bocal prevenir em grande escala a nebulosidade.

Heisel et al. (1998) elaboraram um modelo esquemático do sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação baseado no princípio de pressão, apresentado na figura 2.16.

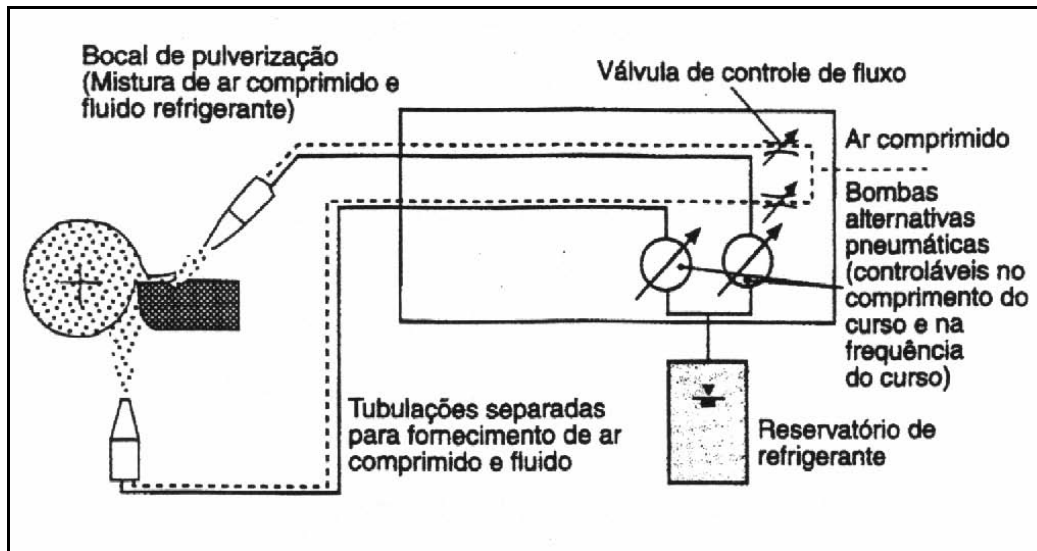


Figura 2.16 – Modelo esquemático de um Sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação por pressão (HEISEL et al., 1998).

Heisel et al. (1998) atentam ainda para o fato de que os sistemas de Mínima Quantidade de Lubrificação requerem um espaço muito pequeno para instalação, podendo ser fixado em diversas posições. Deste modo, o sistema de MQL torna-se flexível podendo ser aplicado tanto na retificação quanto em outros processos de corte.

2.6 Variáveis de saída envolvidas no processo

As análises das variáveis de saída do processo de retificação permitem avaliar o desempenho da operação, baseando-se nos objetivos do processo de retificação que visa a obtenção de produtos com elevada qualidade superficial, dimensional e geométrica. No entanto, segundo Hassui & Diniz (2003), tais requisitos devem estar inter-relacionados a uma busca constante por maior produtividade, redução de custos e maior flexibilidade do sistema de produção.

Todavia, a otimização do processo deve ser metódica e exaustivamente estudada pelo fato de englobar uma série de fatores que podem interferir de forma direta ou indireta no processo (HASSUI & DINIZ, 2003). Além disso, a implementação de Comandos Numéricos Computadorizados (CNC) às máquinas retificadoras tem auxiliado no que diz respeito ao desempenho do processo, fazendo com que todos os deslocamentos e acionamentos envolvidos estejam livres da influência do operador,

garantindo deste modo uma redução das imprecisões que conduzem a resultados insatisfatórios.

Segundo Rowe et al. (1996) o emprego de comandos numéricos computadorizados no processo de retificação possibilita:

- Gravar e manipular informações referentes à produção dentro de um banco de dados;
- Selecionar corretamente a ferramenta abrasiva;
- Selecionar as condições de trabalho da máquina operatriz;
- Controlar a máquina operatriz;
- Otimizar e monitorar o desempenho do processo abrasivo;
- Captar os valores otimizados dos parâmetros envolvidos no processo;
- Compensar as variações decorrentes da máquina e do processo.

Kaliszer et al. (1979) apud Rowe et al. (1997) desenvolveram um sistema de controle para o processo de retificação cilíndrica externa, tendo como “avaliadores do sistema” o tamanho da peça, erros de forma e rugosidade. Os autores afirmam que, baseando-se nestes fatores, conseguiram reduzir o tempo de execução do ciclo de retificação.

Amitay et al. (1981) apud Rowe et al. (1997) também desenvolveram um sistema de controle baseando-se na otimização do ciclo de retificação. Tal sistema visava otimizar as condições de corte e de dressagem, empregando uma taxa de avanço bastante elevada. Ênfase foi dada à queima da peça e aos níveis de rugosidade atingidos, tendo como parâmetros de controle a velocidade da peça e o avanço radial.

Byrne et al. (1995) apud Silva (2004) citam que os sensores empregados no monitoramento do processo devem ser instalados obedecendo-se certos critérios, tais como:

- possibilitar a medição o mais próxima possível da região de corte;
- não interferir na rigidez da máquina operatriz;
- não restringir o espaço de trabalho nem os parâmetros de corte;
- ser resistente ao desgaste, ao ataque químico dos fluidos de corte, aos cavacos e às influências mecânicas, eletromagnéticas e térmicas;
- ser de fácil reposição e ter baixo custo;
- ter funcionamento independente da peça e/ou da ferramenta;

- possuir características metrológicas adequadas;
- ser capaz de transmitir os sinais de forma confiável.

Os sensores devem ser capazes de detectarem fogo/fumaça, nível de som (emissão acústica), presença de óleo, temperatura, contato, desgaste da ferramenta (por meio de sua dimensão), posição das arestas cortantes, vibração mecânica, limites de curso, posição da ferramenta/peça, força, danos na ferramenta, temperatura do fluido de corte, torque, deformações térmicas, rugosidade da peça, distribuição da temperatura na região de corte, pH do fluido de corte, velocidades de avanço da ferramenta, temperatura, umidade, pressão e outros parâmetros de menor importância (BYRNE et al., 1995 apud SILVA, 2004; LEZANSKI, 2001).

Os principais parâmetros de entrada envolvidos no processo de retificação cilíndrica interna de mergulho são: velocidade do rebolo e da peça, profundidade de usinagem e dressagem e também tempo de centelhamento (*spark-out*). Tais parâmetros são mantidos constantes durante a execução deste trabalho.

A seguir será feito um breve detalhamento sobre as principais variáveis de saída analisadas neste trabalho.

2.6.1 Emissão Acústica

A técnica de monitoramento do sinal de emissão acústica (EA) tem sido bastante utilizada na usinagem dos metais pelo fato de ser sensível aos diversos fenômenos que ocorrem durante o processo, tais como: remoção de cavacos, escorregamento de um material sobre o outro, transformação de fase, deformação plástica, micro-quebras, fraturas e impactos. A emissão acústica pode ser definida como ondas de tensão elástica, geradas pela liberação de energia de deformação dentro de um material submetido a um estímulo externo (LIU, 1991).

De acordo com Liu (1991), durante a deformação plástica de um sólido, uma porção da energia de deformação é armazenada em um campo residual de tensão de discordâncias e o restante desta energia é consumida durante o aumento da energia térmica. O deslocamento transversal de discordâncias através da estrutura cristalina do material agrega-se ao movimento de vibração dos átomos. Como resultado, uma pequena porção de energia, cerca de um décimo da energia total do processo, é

direcionada à ampliação do número de discordâncias e de outros defeitos da estrutura cristalina. Estas discordâncias possibilitam a existência de deslocamentos a um nível de tensão abaixo da tensão de cisalhamento. Esta movimentação de discordâncias durante a fase de deformação plástica é responsável pela geração de ondas de emissão acústica.

Vale ressaltar que todos os mecanismos capazes de gerar ondas de emissão acústica têm em comum a movimentação rápida de um grupo de átomos visando retornarem a posição de equilíbrio (BALDO, 1994). Esta movimentação pode ser detectada por sensores que a transformam em sinais elétricos, com frequências entre 50 e 1000 kHz (DORNFELD & BLUM, 1990 apud BALDO, 1994).

Os sinais de emissão acústica são preferíveis frente aos outros sinais utilizados para o monitoramento do processo, justamente por sua faixa de frequência estar bem acima das vibrações mecânicas e ruídos elétricos, condição que facilita a filtragem de tais interferências (KIM et al., 2001; LIU et al., 2005).

Todavia, as elevadas faixas de frequência do sinal de emissão acústica são desvantajosas no que diz respeito ao armazenamento das informações, necessitando de placas analógica-digital com frequências de amostragem 1000 vezes maior, além de computadores com maiores capacidades de memória. Para evitar este inconveniente, Liu (1991) sugere que se faça uso da faixa de baixa frequência contida na ampla banda de frequência do sinal bruto de emissão acústica. Isto é conseguido retificando-se o sinal bruto de emissão acústica em intervalos de tempo determinados, aplicando-se a chamada voltagem RMS (root means square), reduzindo, desta forma, a frequência do sinal de saída. O sinal RMS da emissão acústica é definido como o valor quadrático médio do sinal de entrada.

Kim et al. (2001) alertam ainda para a necessidade de fixação do sensor o mais próximo possível da zona de retificação, visando à obtenção de um sinal com boa sensibilidade e com baixos níveis de interferência.

Quanto à natureza das ondas, Blum & Dornfeld (1990) apud Baldo (1994) afirmam que estas podem ser de cisalhamento ou longitudinal, dependendo da reflexão e da difusão sofridas pela onda durante a sua propagação.

Segundo Liu (1991) os sinais de emissão acústica podem ser classificados em contínuos e transientes. As emissões transientes são produzidas quando a tensão excede um nível necessário para causar um evento discreto, como por exemplo, uma fratura acompanhada de uma energia de relaxamento. As emissões contínuas caracterizam-se

pela superposição de emissões transientes aleatórias, com médias de repetição muito maiores que a duração do transiente. Emissões transientes estão associadas à micro-quebras superficiais e formação de linhas de escorregamento, enquanto emissões contínuas estão associadas a mecanismos internos, como ondas de emissão acústica captadas durante o processo de remoção de material.

A técnica de emissão acústica pode ser empregada para vários propósitos, pelo fato de captar informações referentes à micro-fenômenos tais como controle do tempo de centelhamento, desgaste/queima/colisão da ferramenta, monitoramento e diagnóstico do desempenho da máquina e do processo de dressagem, eliminação de tempos improdutivos de retificação, controle relativo à afiação dos grãos abrasivos, monitoramento da peça, no que diz respeito à geometria e dimensões, qualidade superficial, tolerâncias e danos metalúrgicos e ainda possibilita a verificação do processo em si, na formação de cavaco, temperatura e consumo de energia.(DORNFELD, 1999; SUSIČ & GRABEC, 2000; KIM et al., 2001).

2.6.2 Rugosidade das peças retificadas

De acordo com Agostinho et al. (1981) apud Catai (2004), rugosidades podem ser definidas como micro-irregularidades geométricas decorrentes do processo de fabricação. A mensuração desta grandeza é feita baseando-se nos parâmetros de altura e largura dessas irregularidades.

A qualidade da superfície gerada no processo de retificação é capaz de avaliar características da peça e da operação, tais como mínimas tolerâncias, eficácia do método de lubrificação, condições da ferramenta, transmissão de calor e vibração da máquina (HECKER & LIANG, 2003). De acordo com Wang et al. (2005) a rugosidade das superfícies utilizadas na maioria das aplicações industriais é definida entre 0,025 e 1,5 μ m.

Segundo Hecker & Liang (2003), uma superfície típica do processo de retificação é isenta de sinais de corte e ranhuras. Todavia, vários micro-defeitos podem ser constatados fazendo-se uma análise minuciosa da superfície do material usinado, sendo os principais deles trincas ocasionadas por bruscas variações térmicas e crateras provocadas pelas fraturas dos grãos abrasivos. Além disso, a qualidade superficial pode ser afetada também pela natureza transversal e longitudinal das ondas de emissão

acústica, as quais são provocadas pela aleatoriedade do processo de remoção de material. Tawfik (1993) apud Ali & Zhang (1999) afirmam que a qualidade superficial é diretamente dependente da profundidade de corte empregada e da dureza do material que está sendo usinado.

No que diz respeito ao comportamento da rugosidade em função do tempo de retificação, verifica-se que esta variável está diretamente relacionada com o crescimento da área plana do topo dos grãos abrasivos, que provoca sulcos mais largos nas peças. Além disso, o aumento da área de contato do topo do grão causa uma elevação da temperatura local, fazendo com que o material da peça se torne mais mole, aderindo-se mais facilmente aos poros do rebolo. Desta forma, este material aglutinado à ferramenta abrasiva acaba gerando vários riscos na peça, aumentando assim os valores de rugosidade (MALKIN, 1989; OLIVEIRA et al., 1992).

Hecker & Liang (2003) afirmam que um método eficiente de se mensurar a qualidade da superfície produzida é por meio do parâmetro definido como rugosidade, o qual é representado em função da distância entre os picos e vales existentes na superfície produzida. Assim, pode-se obter a rugosidade pela média dos valores dessa distância (rugosidade R_a), pelo valor quadrático médio dessa distância (rugosidade R_q) ou ainda pelo valor máximo da mesma (rugosidade R_t).

Neste trabalho utilizou-se o parâmetro R_a para determinação dos valores de rugosidade. Segundo Hecker & Liang (2003) este parâmetro é definido matematicamente de acordo com a equação 2.10:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y - y_{CL}| \cdot dl \quad (2.10)$$

Onde:

L é o comprimento de medição;

y é a altura do pico ou a profundidade do vale;

y_{CL} é a variável que define o posicionamento da linha de centro. Vale ressaltar que as áreas localizadas abaixo e acima desta linha são idênticas.

Malkin (1989) construiu um modelo empírico de determinação da rugosidade baseando-se apenas nas condições cinemáticas. A execução de tal método dependia apenas da determinação das constantes em função do material da peça, do tipo de

lubrificação e do tipo de rebolo, podendo desta forma, ser facilmente empregado na indústria.

Snoeys & Peters (1974) apud Hassui (2002) definiram uma relação bastante objetiva, visando a determinação da rugosidade em função do cavaco equivalente:

$$R_a = R_1 \cdot h_{eq}^r \quad (2.11)$$

Onde:

R_1 e r são constantes definidas de acordo com o tipo de ferramenta, material da peça e tempo de centelhamento.

Os autores da equação observaram que os valores de rugosidade aumentam de maneira diretamente proporcional aos valores de h_{eq} .

Os índices de rugosidade medidos longitudinalmente em relação à direção de corte, apresentam valores mais baixos do que os medidos transversalmente (HECKER & LIANG, 2003). Todavia, na indústria e também neste trabalho, aplica-se preferencialmente o método de medição transversal.

Bianchi et al. (1997) apud Hassui (2002) analisaram a rugosidade obtida na retificação de vários aços usinados com diferentes ferramentas. Os autores puderam concluir que na retificação de aços frágeis utilizando-se rebolo macio, a rugosidade decresce à medida que se amplia o número de grãos ativos, responsáveis pela redução da espessura relativa do cavaco. No que diz respeito a aços dúcteis retificados com rebolo macio de granulometria fina, observou-se que a rugosidade foi crescente de acordo com o desgaste do rebolo, devido ao aumento do número de grãos cegos na superfície do rebolo.

Kwak et al. (2005) estudaram a relação entre a rugosidade e a força de corte envolvida na operação de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço SCM 440. Os autores observaram que um aumento da profundidade de corte foi responsável por aumentar a intensidade da força, o que por consequência, aumentou as alturas dos picos de rugosidade. Utilizando-se maiores tempos de *spark-out* conseguiu-se reduzir a intensidade da força, no entanto, os valores de rugosidade não se enquadraram dentro dos padrões desejados.

2.6.3 Desgaste do rebolo e relação G

O desgaste do rebolo se dá de modo bastante complexo em função dos diversos fenômenos que ocorrem entre os grãos abrasivos e a peça durante o processo de retificação. Segundo Malkin (1989) é deficiente o equacionamento que rege o mecanismo de desgaste de uma ferramenta abrasiva, sendo ele feito quase que integralmente de maneira empírica, por meio de um inter-relacionamento dos parâmetros envolvidos no processo.

Oliveira et al. (1992) afirmam que o desgaste do rebolo está relacionado à perda diametral da ferramenta (desgaste volumétrico) e também com a perda da capacidade de corte da face de trabalho. Tais fenômenos dependem em grande escala do tipo do rebolo, das condições de dressagem e de retificação e também da dureza do material de que a peça é feita. Normalmente os dois tipos de desgaste ocorrem simultaneamente, diferindo apenas em intensidade. Observa-se, contudo, que o desgaste abrasivo prevalece sobre os outros desgastes, resultando na perda das arestas cortantes dos grãos. Isso pode ser verificado pela remoção forçada de material e ineficiente expulsão dos cavacos da porosidade do rebolo, formando um empastamento na região de corte.

O desgaste por atrito está relacionado ao ‘cegamento’ dos grãos abrasivos e conseqüente ampliação de áreas planas, as quais promovem um aumento do atrito entre o rebolo e a peça, podendo ocasionar danos térmicos. A fratura do grão e do aglomerante está relacionada à submissão da ferramenta a esforços demasiados. A fratura do aglomerante implica num desgaste bastante acentuado do rebolo pelo fato de permitir o desalojamento de grãos abrasivos inteiros.

Todavia, o desgaste por atrito é o mais importante dentre todos os outros desgastes, pois é ele quem controla diretamente a intensidade das forças de retificação e também a taxa de fratura do aglomerante. Sabe-se que os grãos abrasivos, durante o processo de retificação, são submetidos a esforços normais e tangenciais. Esforços normais (f_n) tendem a gerar tensões compressivas, enquanto esforços tangenciais (f_t) proporcionam o surgimento de tensões de tração (MALKIN, 1989).

A resistência do rebolo ao desgaste pode ser associada ao parâmetro relação G, definido como sendo a relação entre o volume de material removido (Z_w) e o

correspondente volume de rebolo gasto (Z_s), ambos em mm^3 . Logo, a relação G pode ser expressa, segundo Malkin (1989) de acordo com a equação 2.12:

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (2.12)$$

Partindo-se desta equação, verifica-se que um valor pequeno da relação G implica em um desgaste elevado do rebolo, indicando a ocorrência de auto-afiação com renovação automática dos grãos abrasivos. Todavia, se o desgaste for pequeno, a relação G é alta, não havendo troca dos grãos gastos, resultando na perda da agressividade do rebolo.

Bianchi (1996) estudou a influência da velocidade da peça no desgaste do rebolo e verificou que o emprego de maiores velocidades da peça, mantendo-se a velocidade de avanço e a rotação do rebolo constantes, resulta em uma menor penetração da ferramenta por volta da peça, provocando grandes impactos entre os grãos e a peça, proporcionando a formação de cavacos curtos. Este fenômeno reduz o número de grãos abrasivos localizados na superfície do rebolo, aumentando os esforços sobre cada um deles. Sob esforços os grãos tendem a se fraturarem e a se auto-afiarem, estabilizando as forças de corte. Esta condição, no entanto, provoca um desgaste volumétrico maior da ferramenta.

Por outro lado, utilizando-se baixas velocidades da peça, observa-se uma maior penetração do rebolo por volta da peça, fato que implica em menores impactos dos grãos abrasivos com a peça formando, deste modo, cavacos alongados. Com menores impactos, o tempo de contato e o número de grãos ativos são maiores, reduzindo os esforços por grão abrasivo. Neste caso, observa-se uma tendência à formação de áreas planas nos grãos, aumentando os esforços de corte gradativamente, resultando em um desgaste volumétrico menor.

2.6.4 Desvios de Circularidade

De acordo com Cho & Tu (2001) o desvio de circularidade é definido baseando-se em dois limites circulares concêntricos que compreendem o maior pico e menor vale

de um perfil (ASME Y14.5M-1994). Ressalta-se que as variações de perfil observadas entre os limites estabelecidos não interferem no valor final da variável.

O monitoramento dos desvios de circularidade é fundamental para que se consiga uma análise de tolerância bastante precisa de peças com geometria circular (CHO & TU, 2001). Os erros de circularidade ocasionado pelo processo durante a usinagem (figura 2.17), estão relacionados às condições de retificação, aos danos térmicos que possam ter ocorrido, às solicitações mecânicas e às condições de aplicação do fluido de corte. O erro de circularidade expressa qual o erro de forma final da peça usinada, ou seja, indica o estado cilíndrico final da peça, fator muito importante nos processos de retificação de precisão (FUSSE et al., 2005).

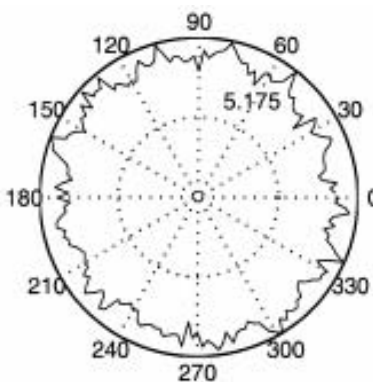


Figura 2.17 – Desvio de Circularidade observado em uma peça retificada(CHO & TU, 2001).

Segundo Chen (2002) os desvios de circularidade estão relacionados a rotações imperfeitas do conjunto peça-ferramenta, a vibrações associadas ao desbalanceamento do rebolo, a ações de corte errôneas, a lubrificação inadequada, ao desgaste da ferramenta e a defeitos em componentes da máquina. Isto é explicado pelo fato de tais componentes serem fabricados por outras máquinas-ferramentas (tornos, fresas, furadeiras etc.), que também produzem peças com erros de circularidade, permitindo deste modo a transferência dos desvios de uma máquina para outra.

Outro fator responsável por ocasionar desvios de circularidade é o desbalanceamento do rebolo, o qual é causado por uma massa ou concentração de massa que não está distribuída simetricamente sobre o eixo de rotação. Este desbalanceamento de massa do rebolo irá atritar a peça alternadamente e pode ser pensado como um vetor unidirecional de desequilíbrio de magnitude constante, que gira com o fuso.

2.6.5 Análise da microestrutura - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Paralelamente ao desenvolvimento dos microscópios eletrônicos de transmissão surgiu o microscópio eletrônico de varredura, um outro tipo de instrumento, capaz de possibilitar a visualização da superfície de amostras volumosas. Estes instrumentos obtiveram rapidamente grande aceitação devido à sua ampla gama de utilização e a facilidade na preparação das amostras. Mannheimer (2002) afirma que o MEV tem sua maior aplicação no exame de superfícies rugosas (contraste topográfico). A fácil visualização e interpretação das imagens foram desde o início um dos elementos marcantes do sucesso do instrumento.

Este tipo de equipamento possui algumas vantagens com relação ao microscópio óptico, devido à sua alta resolução em torno de $0,003\mu\text{m}$ contra $0,1\mu\text{m}$ do microscópio óptico.

O poder de resolução do MEV garante ampliações da ordem de 10 a 300.000 vezes.

Uma outra vantagem é a profundidade de foco, cerca de 300 vezes maior no MEV. O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento de grande potencial, podendo realizar diferentes análises. Na área de materiais o MEV é utilizado principalmente na análise microestrutural, como precipitados, fases, análise de superfícies fraturadas (análise de falhas), micro-análise qualitativa e quantitativa com o auxílio de acessórios, determinação do tamanho de grão e porcentagem de fase em microestruturas de materiais, além disso possui uma análise voltada para pesquisa e desenvolvimento com fácil interpretação das imagens, com aparência tridimensional.

2.6.5.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Segundo os trabalhos desenvolvidos por BOTTA & MOREIRA (2001) e CARMO (2002).

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um dos mais versáteis equipamentos utilizados em ciência e tecnologia. É amplamente empregado nas mais diversas áreas de conhecimento, tais como biologia, medicina, geologia e diversas engenharias. Na caracterização de materiais, o MEV é de fundamental importância no estudo de metais, cerâmicas, polímeros, compósitos e semicondutores.

Novos desenvolvimentos tecnológicos na área eletrônica, de materiais e mecânica de precisão têm contribuído para o MEV torne-se um equipamento mais acessível economicamente, de mais fácil operação e capaz de apresentar melhores resultados nas análises. Devido a essas facilidades, diversas universidades, centros de pesquisa e empresas brasileiras já usufruem deste equipamento, embora ainda haja um enorme campo para ampliação de sua utilização.

Mesmo diante da grande versatilidade e utilidade do equipamento, o MEV é ainda pouco ou nada conhecido por grande parte dos metalurgistas e metalógrafos brasileiros. Assim pretende-se com esta revisão, apresentar as principais características, possibilidades de aplicação, vantagens e desvantagens do MEV em relação ao Microscópio Óptico (MO).

2.6.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura e Microscopia Óptica

Na tabela abaixo apresenta-se os principais parâmetros de comparação entre o Microscópio Óptico (MO) e o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Tabela 2.2– Comparação dos parâmetros entre MO e MEV

	MO	MEV
Resolução*	0,25 μm	0,003 μm
Aumento	2000 vezes	150.000 vezes
Profundidade do Foco	Duas dimensões: largura e altura	Três dimensões: largura, altura e profundidade

* Quanto menor o valor numérico atribuído à resolução de um microscópio, maior a resolução do equipamento.

Além das vantagens apresentadas acima, utilizando-se detectores adequados, o MEV apresenta também a possibilidade de realizar microanálise química com elevada resolução espacial. Isso significa que se pode escolher uma pequena área da amostra e determinar sua composição química. Dessa forma, pode-se, por exemplo, determinar a composição de inclusões, precipitados e corpos estranhos. No MO muitas vezes consegue-se identificar certas inclusões e partículas, mas os procedimentos são

complexos e envolvem comparação com padrões conhecidos, uso de luz polarizada, etc. Além de tornar muito mais simples esse tipo de análise, o MEV é mais conclusivo.

2.6.5.3 Aspectos Básicos da Construção e Funcionamento do MEV

Neste item serão apresentadas informações sobre a geração e focagem do feixe, detectores, tubos de raios catódicos e sistema de vácuo. A figura 2.19 apresenta o esquema de um MEV, com alguns dos principais componentes.

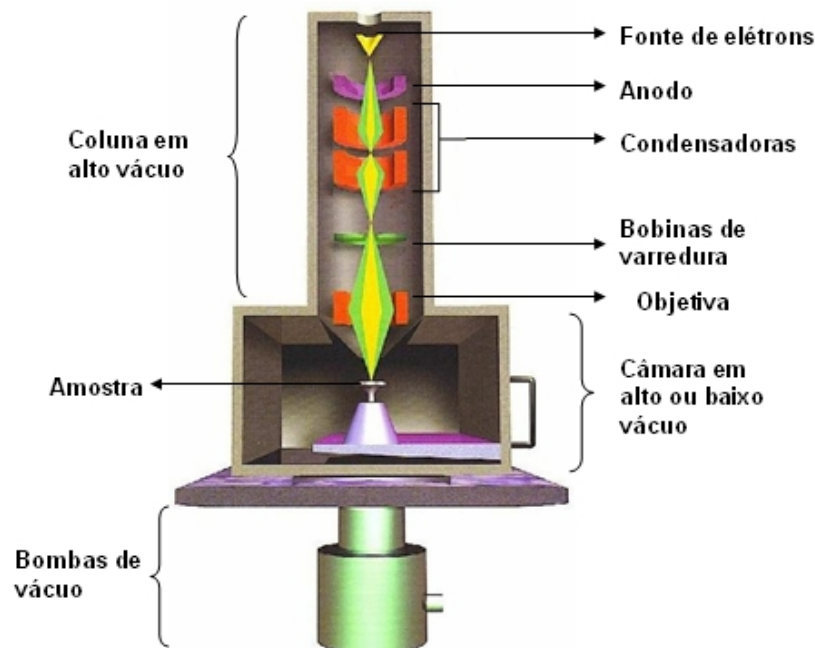


Figura 2.19 - Esquema de construção do MEV.

2.6.5.3.1 Geração e focagem do feixe

O sistema de geração e focagem compreende um canhão de elétrons e várias lentes magnéticas que servem para produzir um feixe de elétrons coerente e colimado que pode ser focado sobre a amostra.

2.6.5.3.2 Canhão de elétrons

O canhão de elétrons pode ser subdividido em:

- Fonte de elétrons (catodo) que gera elétrons e é mantida a um potencial negativo com relação ao solo;
- Um escudo com uma abertura, mantido a um pequeno potencial relativo com relação ao filamento;
- Um anodo mantido a um grande potencial positivo com relação ao filamento.

Na figura 2.20 pode-se visualizar o esquema de um canhão de emissão de elétrons. Os elétrons são produzidos da seguinte forma: a passagem de uma corrente através do filamento o aquece até um ponto onde o gradiente de voltagem entre o filamento e o anodo produz elétrons, que são então acelerados pela diferença de potencial entre o anodo e o filamento. A energia dos elétrons acelerados fica na faixa de 1-40 keV para um MEV convencional.

O filamento de tungstênio *hairpin* é o tipo mais comum de fonte de elétrons em uso. Um fio fino de tungstênio na forma de *hairpin* é soldado a dois eletrodos que são conectados ao sistema de alta voltagem, conforme apresentado na figura 2.21. Um isolante cerâmico previne a formação de arcos entre o filamento e a fonte de alta voltagem. Filamentos de tungstênio são populares porque operam sob vácuo menor que o necessário para outros tipos de fontes de elétrons e são os mais baratos. Em um microscópio bem operado, filamentos de tungstênio podem funcionar por aproximadamente 100 horas antes de falhar.

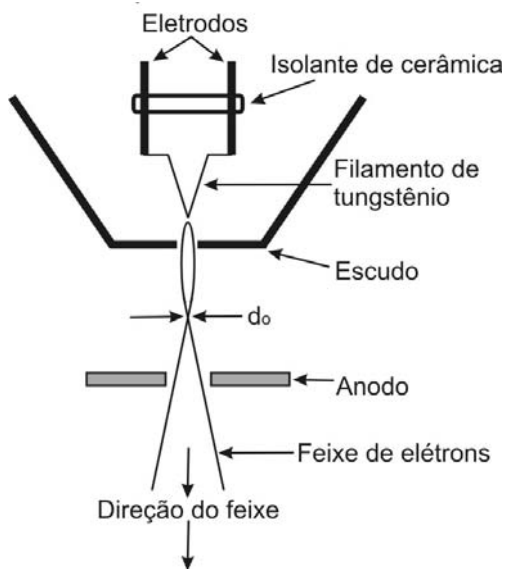


Figura 2.20 - Esquema de um canhão de elétrons.

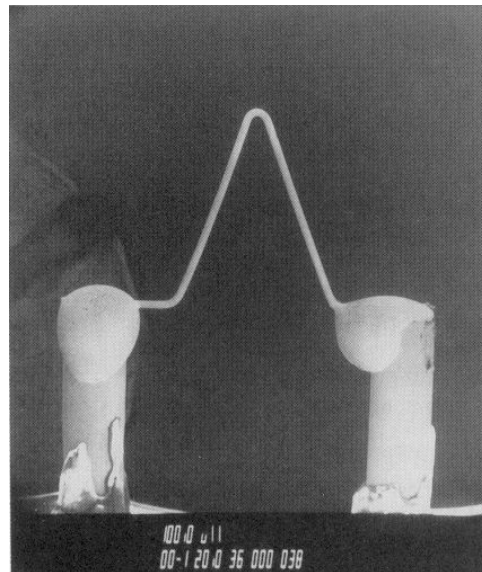


Figura 2.21 - Filamento de tungstênio.

Ao redor do filamento de tungstênio há um escudo (*shield*, *grid cap* ou *Wehnelt cylinder*). Este escudo é um cilindro fracamente biased que serve para colimar os elétrons do filamento e dirigi-los ao anodo. A abertura arredondada é centrada sobre a ponta do filamento. A distância que separa a ponta e o escudo (1-2 mm) é crítica no controle da corrente do feixe. Uma tensão aplicada ao escudo permite que apenas os elétrons formados na ponta do filamento formem o feixe.

Os elétrons que passam pela abertura do escudo são atraídos em direção ao anodo, o terceiro componente do canhão de elétrons. O anodo está a um grande potencial com relação ao filamento, causando aceleração dos elétrons. A diferença de potencial entre o anodo e o filamento é a tensão de aceleração (*accelerating voltage*). Uma faixa de tensões entre 1 e 30 keV é disponível na maioria dos MEVs. A escolha da tensão de aceleração depende do tipo de espécime (amostras condutoras ou não condutoras) e do tipo de informação desejada.

2.6.5.3 Lentes magnéticas e sistema de varredura

As lentes eletrônicas são utilizadas para reduzir o diâmetro do feixe que sai do canhão de elétrons ($d_0 \sim 10\text{-}50 \mu\text{m}$ para um canhão termo-iônico) até o tamanho final do feixe no espécime (1 nm – 1 μm).

Tais lentes são usadas também para focagem e aumento da imagem. O foco é obtido pela variação da corrente que passa através da lente final, tradicionalmente chamada de lente objetiva responsável por modificar a distância focal. Na maioria dos MEVs, o feixe de elétrons emerge da lente final para dentro da câmara da amostra, onde interage com região próxima da superfície do espécime até a profundidade de aproximadamente 3-5 μm e gera os sinais usados para formar a imagem. A formação da imagem requer um sistema de varredura para construir a imagem ponto a ponto.

Para produzir contraste em uma imagem, a intensidade do sinal da interação do feixe com a amostra deve ser medida de ponto a ponto ao longo da superfície do espécime. A função do sistema de deflexão é varrer o feixe ao longo de uma linha e então deslocar a posição da linha para a próxima varredura de tal modo que um rastro retangular seja gerado no espécime e na tela de visualização. Dois pares de bobinas eletromagnéticas de deflexão (bobinas de varredura) são usados para controlar o rastro do feixe. O aumento da imagem da amostra é a razão entre o tamanho linear da tela de visualização, conhecida como tubo de raios catódicos (cathode ray tube - CRT), e o tamanho linear do rastro de varredura no espécime. Então, um aumento maior pode ser obtido através da menor excitação das bobinas de varredura de tal modo que o feixe seja defletido por uma menor distância no espécime. O aumento maior é obtido porque uma menor área varrida vai parecer maior quando mostrada na tela. Assim, um rastro de 100 μm no espécime se torna uma imagem de aumento de 1000 vezes quando a imagem é mostrada numa tela de 10 cm de largura. Normalmente as imagens na tela apresentam indicação do aumento utilizado, além de uma barra de microns a partir da qual as dimensões podem ser medidas. A barra de microns é mais útil quando uma microfotografia é ampliada ou reduzida, pois a indicação numérica do aumento vai se tornar incorreta.

2.6.5.3.4 Detectores

A interação do feixe de elétrons com a amostra causa a geração de muitos sinais que podem ser usados para modular a intensidade do CRT e produzir uma imagem ou realizar microanálise. Para o aproveitamento desses sinais, há vários detectores localizados na câmara da amostra. Cada detector é projetado e localizado de forma a ter máxima eficiência na coleção de um determinado tipo de sinal. Os dois sinais mais

utilizados para produzir imagens são Elétrons Secundários (ES) e Elétrons Retroespalhados (ER). Para a microanálise é usado o sinal de raio-X (que também pode ser usado para formação de imagem).

2.6.5.3.5 Tubo de raios catódicos

Como já foi apresentado anteriormente, o feixe de elétrons é varrido sobre a amostra. Há sintonia entre as varreduras da amostra e do tubo de raios catódicos (CRT), fazendo a correspondência entre uma série de pontos na amostra e no CRT, levando à formação da imagem. Então, quando o feixe passa por um determinado ponto, há uma interação com a amostra, possibilitando a geração dos sinais, fazendo com que o detector apropriado (que depende do modo de imagem em que se está trabalhando) envie o sinal ao CRT. O sinal desse ponto excita um ponto correspondente na tela do CRT. A varredura rápida e a diferença na intensidade do sinal de cada ponto da amostra formam a imagem na tela. Na figura 2.22 pode-se observar um esquema da correspondência entre a varredura na amostra e no CRT com aumento L/l .

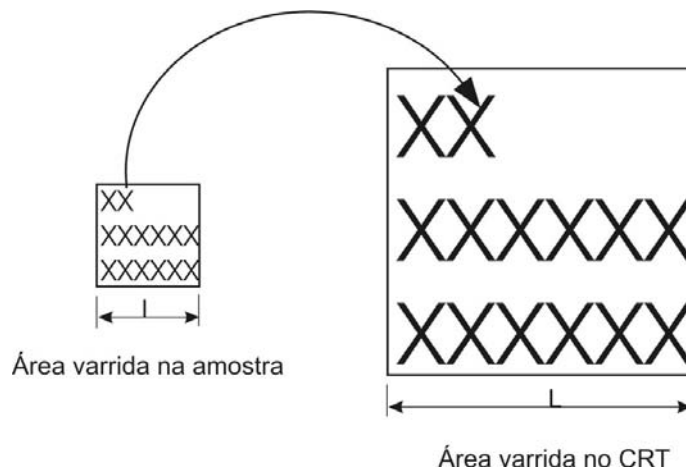


Figura 2.22 - Princípio da formação de imagem através da varredura de uma área.

(Adaptado de BOTTA & MOREIRA, 2001).

2.6.5.4 - Interações Entre o Feixe de Elétrons e a Amostra

A versatilidade da microscopia eletrônica de varredura e da microanálise de raios-X é derivada da rica variedade de interações entre o feixe de elétrons e a amostra. Estas interações podem revelar informações sobre a composição da amostra, topografia,

cristalografia, potencial elétrico, campo magnético local, além de outras propriedades. A seguir, serão apresentados os sinais mais utilizados em microscopia eletrônica de varredura: elétrons secundários (ES), elétrons retroespalhados (ER) e raios-X (RX).

2.6.5.4.1 Volume de interação

Quando o feixe de elétrons atinge a amostra, excita uma determinada região da mesma. Essa região é denominada volume de interação e seu tamanho é dependente da energia do feixe incidente: quanto maior a energia, maior o tamanho do volume de interação. Outro fator que influencia o volume de interação é o número atômico médio da região excitada: quanto maior o número atômico, menor o volume de interação, pois o feixe tem maior dificuldade de penetrar na amostra. Nesta região excitada, os diversos sinais são gerados a diferentes profundidades, como se pode verificar na figura 2.23. Os elétrons secundários são gerados numa camada de aproximadamente 10 nm de profundidade. A profundidade de geração dos elétrons retroespalhados depende muito da energia do feixe e da composição do espécime, mas é muito maior que a dos elétrons secundários. Em uma liga de cobre-10% cobalto, por exemplo, a profundidade de geração de ER é da ordem de 450 nm.

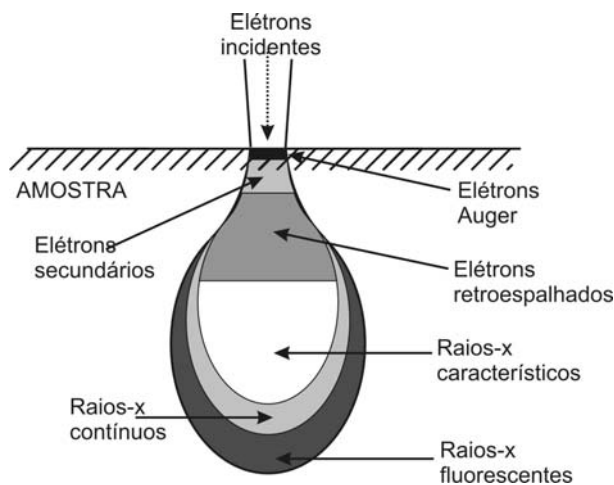


Figura 2.23 - Volume de interação entre a amostra e o feixe de elétrons incidente.

2.6.5.4.2 Elétrons secundários

Os elétrons secundários são produzidos principalmente como resultado de interações entre elétrons de feixes de alta energia e elétrons fracamente ligados na banda de condução (em metais) ou na camada de valência (em isolantes e semicondutores). Os elétrons excitados com energia suficiente para se movimentar dentro do sólido são chamados de elétrons secundários. Durante sua movimentação, estes elétrons estão sujeitos a um espalhamento inelástico e perda de energia. Se o elétron secundário retém energia suficiente quando alcança a superfície para vencer a barreira de energia, ele é emitido do sólido como um elétron secundário. A maioria dos elétrons secundários ejetados tem energia menor que 10 eV e por definição arbitrária todos os elétrons secundários “lentos” são emitidos com energia menor que 50 eV. Elétrons mais fortemente ligados podem ser ejetados com maiores energias cinéticas, criando os chamados “elétrons secundários rápidos”, os quais são muito mais raros que os lentos.

O contraste em imagens de elétrons secundários depende principalmente do ângulo de inclinação e da topografia do espécime. Sendo assim, esse tipo de sinal é muito utilizado quando se deseja informação sobre as características estruturais da superfície do espécime.

2.6.5.4.3 Elétrons retroespalhados

Em uma colisão elástica (elétron-núcleo), um elétron primário atinge o núcleo de um átomo e é rebatido com uma perda de energia desprezível (~ 20% abaixo da energia do feixe incidente) e uma pequena deflexão angular. Alguns desses elétrons atingem a superfície do espécime e são emitidos em sentido contrário. Tais elétrons são chamados de elétrons retroespalhados.

Embora imagens de ES sejam as mais frequentemente obtidas com o MEV, imagens de ER também fornecem importantes informações. ERs variam em quantidade e direção influenciados pela composição, topografia, cristalinidade e magnetismo do espécime. O contraste em uma imagem de ER depende de:

- Taxa de geração de ERs, que por sua vez depende do número atômico médio do espécime;
- Dependência do ângulo dos ERs na superfície do espécime (topografia) e
- Mudança na intensidade de ER quando o ângulo do feixe incidente sobre um espécime cristalino é mudado.

A imagem de composição fornece um meio de se distinguir zonas de diferentes números atômicos em um espécime porque cada zona vai apresentar um nível de contraste diferente: áreas mais brilhantes têm número atômico maior; áreas mais escuras possuem número atômico médio menor. Isso ocorre porque em áreas de número atômico maior há maior geração de ER, provocando maior brilho. Chamado de imagem de número atômico ou contraste de número atômico, esta é uma técnica poderosa quando usada em conjunto com a microanálise de raios-X, porque então se tem informação visual e elemental.

A região de geração de ERs é maior que a de ESs, fazendo com que imagens de ER tenham menor resolução espacial que as de ES. Em contrapartida, pelo fato de ter maior energia que ES, os ERs são menos influenciados pelo carregamento e contaminação da amostra.

2.6.5.4.4 Raios-X

Um elétron primário que entra na matriz da amostra e sofre colisões inelásticas pode transferir parte de sua energia a muitos átomos. Como citado anteriormente, um elétron secundário pode ser ejetado de um átomo ionizado. Além desse fenômeno, ocorrem transições de menor energia em átomos não suficientemente excitados para ejetar um elétron, que geram os raios-X e a catodoluminescência (fótons leves). Raios-X são gerados a uma profundidade grande no espécime, sendo que muitos deles possuem energia suficiente para escapar do espécime e serem detectados.

Durante a irradiação, um elétron do feixe primário pode atingir um átomo, que ejeta um elétron de uma camada interna. Para atingir novamente o potencial de terra, um elétron de uma camada mais externa e de maior energia ocupa a vacância deixada e o átomo simultaneamente emite um raio-X que tem energia igual à diferença de energia entre as duas camadas. Esse quantum de energia caracteriza unicamente as transições atômicas de um dado elemento, assim ele é chamado de raio-X característico. Através da medida da energia ou do comprimento de onda pode-se fazer a identificação do elemento.

Além da microanálise os sinais de raios-X podem ser usados na formação de imagens, obtendo-se um mapeamento que mostra a distribuição de um elemento específico. Basicamente, o programa que controla a formação da imagem é preparado

de forma a tornar brilhantes os pontos que contenham determinado elemento. Em programas mais modernos, pode-se atribuir uma cor diferente a um determinado elemento, tendo-se então várias imagens diferentes de uma mesma região, cada uma representando através de uma cor, um elemento.

2.6.5.5 Preparação de Amostras para MEV

O MEV permite que se trabalhe com uma grande variedade de tipos de amostras, logo o usuário deve estar apto a trabalhar com diversos métodos de preparação. Podem ser usadas amostras polidas, de fratura, pós, partículas e outras, cada uma com suas particularidades. Para que se obtenham bons resultados nos trabalhos com o MEV, é importante que as amostras sejam de boa qualidade. Sendo assim, pode-se obter imagens de boa qualidade e microanálises confiáveis. Este item apresenta uma explicação básica sobre alguns tipos de amostras e sua forma de preparação para observação no MEV.

2.6.5.5.1 Tamanho da amostra

A câmara da amostra é um compartimento fechado, que permanece sob vácuo. Portanto, o princípio básico quanto ao tamanho da amostra é que ela caiba dentro da câmara. Deve-se atentar, para que quanto maior a amostra, maiores os cuidados a serem tomados durante a operação do equipamento. Isto porque os movimentos nos eixos X, Y e Z ficam limitados, aumentando a possibilidade de colisão nas paredes na câmara ou em algum detector. Há MEVs que permitem trabalhos com amostras de até 125 mm de diâmetro, mas o convencional são os equipamentos que permitem o uso de porta-amostra com diâmetro de 40-50 mm.

2.6.5.5.2 Limpeza da amostra

Para que se façam boas observações e para preservar o equipamento, uma amostra para MEV deve estar bastante limpa, isenta de poeira, líquidos, óleos, graxas ou qualquer outro tipo de contaminante. Partículas de poeira, por exemplo, ficam carregadas e provocam o aparecimento de artefatos. A presença de óleos e graxas

contamina a coluna, detectores, aberturas, etc. Esse problema da limpeza é mais crítico em equipamento que trabalham sob alto vácuo (os equipados com FEGs e filamentos de LaB_6), pois a presença de substâncias voláteis torna difícil a obtenção do vácuo necessário.

O ideal é que a amostra seja limpa com um solvente orgânico em um banho de ultra-som. Os solventes mais amplamente empregados são acetona e etanol, comuns na prática metalográfica. Após essa limpeza com solvente sopra-se ar limpo sobre a amostra. Se a amostra não puder ser limpa com solvente, deve-se escová-la com um pincel ou escova de cerdas macias (há pincéis apropriados para esse tipo de trabalho), soprando-se ar em seguida. Se a amostra não for usada logo em seguida à limpeza, deve-se guardá-la em um lugar limpo e seco, sendo bastante recomendado o uso de dessecadores, onde a amostra fica protegida contra poeira e umidade.

2.6.5.5.3 Montagem das amostras

As amostras limpas devem ser colocadas em porta-amostras apropriadas que são encaixados dentro da câmara da amostra. Deve-se atentar para que o objeto a ser observado fique bem fixo, evitando movimentações que prejudiquem o trabalho ou mesmo que haja queda dentro da câmara. Outra consideração fundamental é que a amostra deve permitir que o excesso de elétrons do feixe atinja o potencial de terra, ou seja, os elétrons do feixe primário que não são reemitidos pela amostra tenham possibilidade de seguir um caminho que lhes permita “sair” da mesma, evitando o carregamento. O contato elétrico para permitir essa passagem dos elétrons é feito através de fitas condutoras ou de camadas condutoras evaporadas sobre a superfície da amostra.

2.6.5.5.4 Amostras embutidas

Amostras metalográficas embutidas apresentam fixação simples, sendo colocadas em um porta-amostras pouco maior que seu diâmetro, sendo fixadas em seguida por parafusos. Se a amostra não for condutora, deve-se aplicar uma camada

condutora sobre sua superfície para evitar o carregamento. O contato entre a amostra e o porta-amostra é feita por uma fita metálica, que toca um canto da amostra e o parafuso de fixação. Uma montagem desse tipo apresenta semelhança com o esquema visto na figura 2.24. A superfície da amostra deve ficar na altura do porta-amostra, pois caso fique muito acima, aumentam-se as chances de colisão no interior da câmara. Se ficar muito abaixo há perda de sinal, pois uma parte do sinal emitido atinge as paredes do porta-amostra. Para se atingir a altura correta, colocam-se *stubs* sob a amostra.

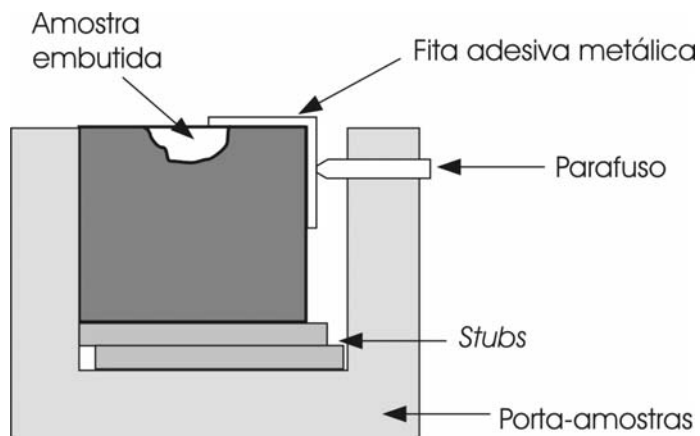


Figura 2.24 - Fixação de amostra embutida.

A utilização de resinas condutoras (contendo pó de cobre ou de ferro) para embutimento de amostras a serem analisadas em MEV dispensa a necessidade de se usar fita condutora para contato.

2.6.5.5 Amostras não embutidas

Quando existe a necessidade de analisar amostras não embutidas, procede-se a fixação das mesmas sobre *stubs* condutores, pequenos discos de alumínio ou carbono. Esta preparação é utilizada principalmente para amostras do tipo bulk ou pó. Amostras em forma de *bulk* podem ser presas ao *stub* por meio de uma fita adesiva condutora de dupla face ou de uma tinta condutora, como visto na figura 2.25. A tinta condutora é utilizada para fixar amostras irregulares, que não apresentam uma boa superfície para apoio e contato.

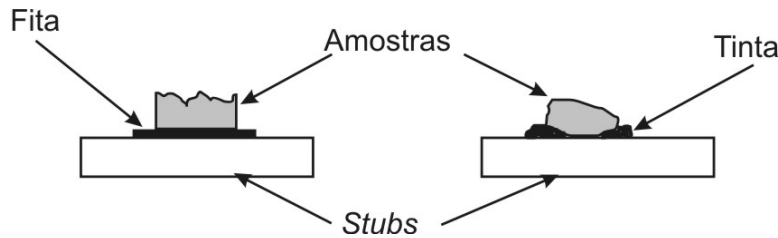


Figura 2.25 - Fixação de amostras irregulares.

A preparação de amostras em forma de pó também usa fitas adesivas dupla face. O pó é colocado sobre um pedaço de fita, retirando-se o excesso; a fita é então colada sobre o *stub*. É importante que se tire todo o excesso de pó, deixando-se somente as partículas bem aderidas à fita, conforme apresentado na figura 2.26. Se o pó for condutor, não necessitando de metalização, deve-se usar a fita condutora; no caso de um pó não condutor que vai necessitar de metalização, pode-se usar a fita condutora ou a não condutora.



Figura 2.26 - Amostras em forma de pó. Em (a), algumas partículas não estão bem aderidas à fita; em (b), todas as partículas estão bem presas.

2.6.6 Microdureza

De acordo Malkin (1989), a queima visível da peça é caracterizada pela presença de tons azulados na sua superfície, os quais são consequência da formação de uma camada de óxidos. A queima pode levar ao aumento da perda diametral do rebolo em função do crescimento da adesão de partículas metálicas nos grãos do mesmo, elevando assim os esforços de corte.

A queima superficial, quando da retificação de aços temperados e revenidos, provoca um aumento da dureza superficial, em função da retêmpera do material, a qual é consequência da reaustenitização do mesmo, seguido da formação da martensita não-revenida. Isto traz um aspecto adverso quanto ao limite de resistência à fadiga do material, pela formação de uma microestrutura frágil. Para os mesmos aços retificados sem a incidência da queima superficial, geralmente existe um amolecimento do material, devido ao fato de se atingir temperaturas inferiores à de austenitização.

De acordo com Malkin (1989), os aços são geralmente retificados em seu estado temperado-revenido. Dependendo da intensidade do aquecimento gerado durante o processo de retificação e da taxa de resfriamento imposta à peça retificada pela ação do fluido de corte, pode-se obter uma diminuição de sua dureza superficial, bem como levar à formação de estruturas martensíticas não-revenidas. Estas são formadas quando atinge-se a temperatura de austenitização do material, seguido de um processo de resfriamento rápido. A formação ou não desta estrutura martensítica, a qual é regida por mecanismos de difusão de carbono, é um processo complexo, definido em função da temperatura atingida durante o processo de corte, do tempo de aquecimento e das velocidades de resfriamento impostas pelo fluido de corte.

Johnson (1986) afirma que as trincas superficiais são resultado do excessivo aquecimento durante a retificação. A severidade das trincas pode variar, sendo que as mesmas podem não ser visíveis, imediatamente após a retificação, tornando-se aparentes, algum tempo depois. Em algumas superfícies submetidas a elevadas tensões residuais de tração, as trincas irão formar-se abaixo da superfície, não sendo visíveis, até que o topo das mesmas seja atacado eletricamente. As trincas reduzem o limite de resistência à fadiga do material, ao mesmo tempo em que aumenta a susceptibilidade da superfície do material à ataques por processos corrosivos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado um detalhamento dos procedimentos adotados para a execução dos ensaios definitivos, assim como dos ensaios cujos resultados não satisfizeram os propósitos para os quais foram requeridos, sendo portanto excluídos do processo.

O banco de ensaios montado foi composto de uma retificadora cilíndrica da marca SULMECÂNICA, modelo RUAP 515 H-CNC, na qual foram instalados alguns acessórios necessários para o trabalho tais como o medidor de vazão de fluido de corte, o sistema de MQL, bocais de aplicação de fluido de corte e sensores de emissão acústica. A retificadora pode ser visualizada na figura 3.1.

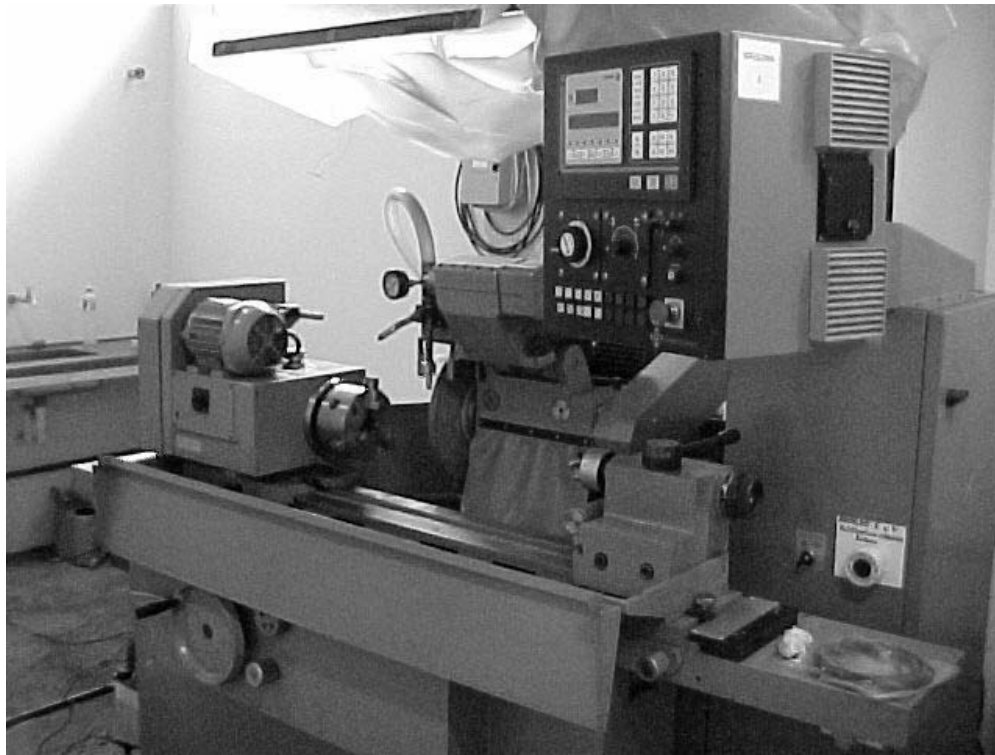


Figura 3.1 – Retificadora cilíndrica SULMECÂNICA com CNC (Comando Numérico Computadorizado).

3.1 Procedimento Experimental

3.1.1 Corpos de prova e suportes de fixação

Inicialmente optou-se por trabalhar com anéis de rolamento, material 100Cr6, com 160,35mm de diâmetro externo, apresentando superfície interna cônica com inclinação de aproximadamente 15°, conforme pode-se visualizar, em corte, na figura 3.2. Para a fixação deste corpo de prova elaborou-se um dispositivo capaz de fixá-lo de maneira adequada sem no entanto efetuar intensos esforços na direção radial responsáveis por interferir nos desvios de circularidade. Este suporte foi construído com grande cuidado buscando reduzir ao máximo possíveis batimentos radiais responsáveis por prejudicar o processo de retificação. O suporte foi feito com cone Morse, facilitando desta forma o seu acoplamento na máquina. Depois de acoplado o suporte, fez-se a rotação da caixa de engrenagens, ajustando com o auxílio de um relógio comparador, de modo que a superfície interna do corpo de prova posicionasse paralelamente à superfície do rebolo. Na figura 3.3 é apresentado o suporte para fixação do corpo de prova à máquina retificadora.

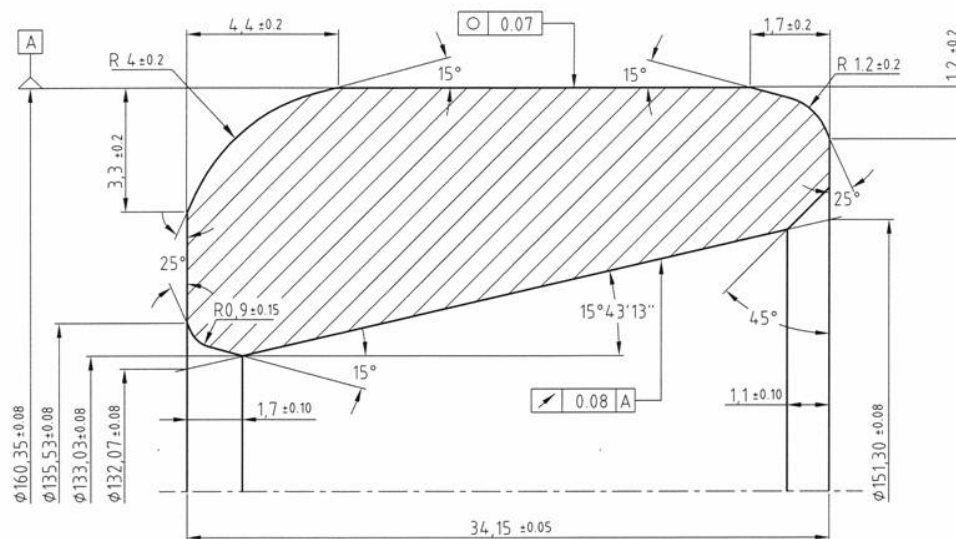


Figura 3.2 – Representação em corte do corpo de prova inicialmente utilizado nos ensaios.

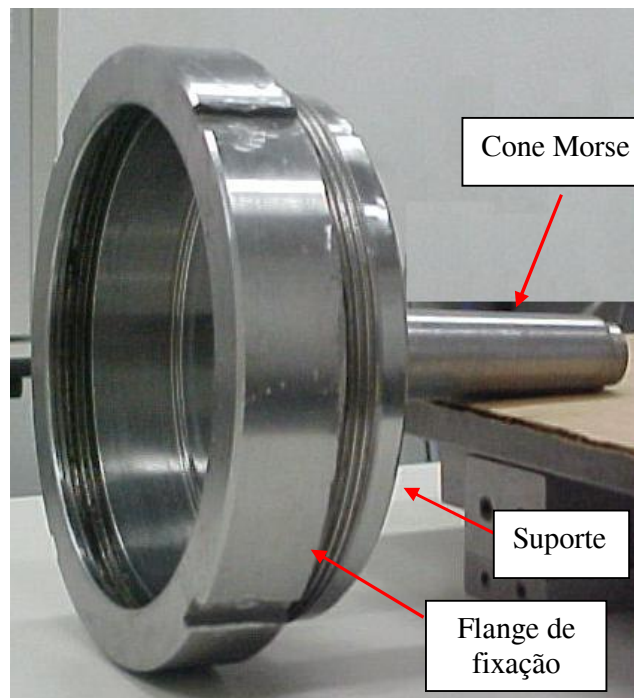


Figura 3.3 – Suporte de fixação do corpo de prova.

O corpo de prova apresentado em corte na figura 3.2 e o suporte apresentado na figura 3.3 foram empregados na primeira parte do trabalho, na qual averiguada o desempenho da técnica de MQL.

Diante da impossibilidade de se obter bons resultados optou-se pela utilização de corpos de prova de menor diâmetro, nos quais os esforços envolvidos na remoção de material seriam menores, o que favoreceria a obtenção de melhores níveis de acabamento nas peças retificadas. Os corpos de provas utilizados para a realização dos ensaios definitivos foram confeccionados em aço SAE 52000 temperado e revenido, apresentando dureza média de 60HRc com 24,4 mm de diâmetro. Apesar de apresentar uma superfície externa cônica, o mesmo apresenta ainda uma região paralela à superfície interna, o que facilitou a sua fixação. Além disso, tais anéis apresentam uma parede espessa, possibilitando a fixação direta na castanha da retificadora (aperto radial). Pelo fato da superfície interna não apresentar angulação, foi possível retornar a caixa de engrenagens da máquina retificadora na sua posição original a 0°. Na figura 3.4 pode-se ver o novo corpo de prova empregado na execução dos ensaios.

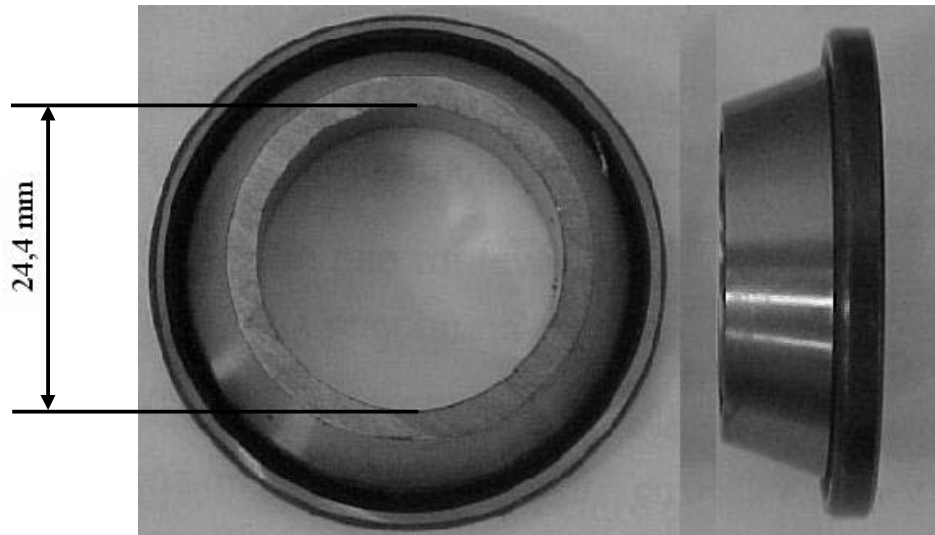


Figura 3.4 – Vistas frontal e lateral do corpo de prova.

A redução do diâmetro do corpo de prova dificultou o acesso à zona de corte, principalmente do bocal de MQL, o qual apresentava maiores dimensões, limitando em algumas situações a liberdade de posicionamento. Diante de tal fato optou-se por aumentar o ângulo de saída do bocal possibilitando com que a mistura ar/óleo atingisse de modo adequado a região de corte.

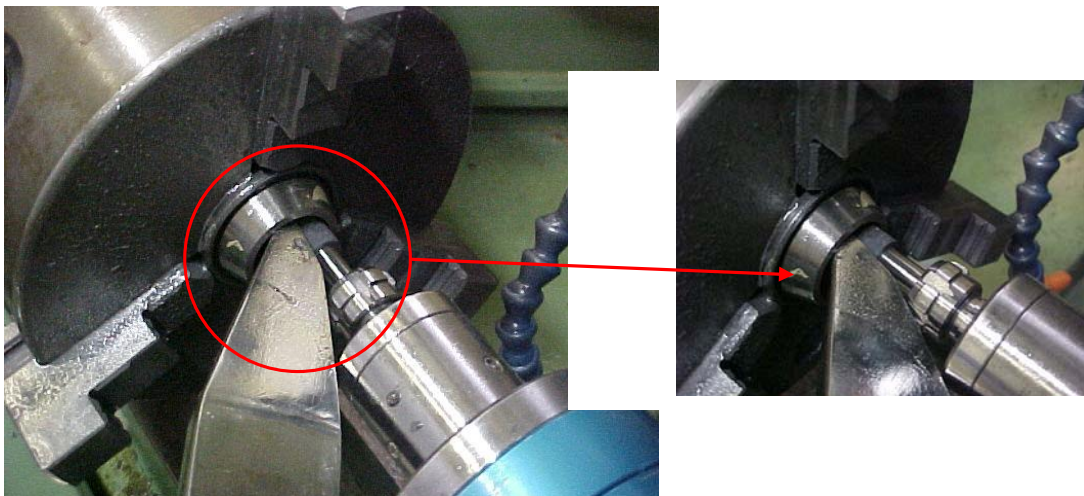


Figura 3.5 – Posicionamento do bocal de MQL próximo à região de corte.

Apesar da grande viabilidade deste corpo de prova frente ao anterior no que diz respeito ao desempenho do processo, ainda assim teve-se dificuldades quanto a fixação do mesmo, devido a incertezas quanto ao paralelismo entre a face da peça e a do rebolo, de complexa aferição e também quanto a intensidade dos esforços exercidos pelas castanhas da máquina. Por este motivo na segunda etapa do trabalho (empregando os métodos otimizado e convencional de lubri-refrigeração com variação da taxa de avanço), optou-se por empregar um novo corpo de prova análogo, dimensional e estruturalmente, ao utilizado para os ensaios com a técnica de MQL. A elaboração dos novos corpos de prova visou facilitar o procedimento de fixação, além de garantir perfeito encaixe no novo suporte fixador empregado, capaz de fixar peças de 53,9 mm de diâmetro (externo), com funcionamento idêntico ao primeiro, conforme apresentado na figura 3.6.



Figura 3.6 – Suporte fixador do corpo de prova.

O material empregado na confecção dos corpos de prova foi o aço ABNT 4340 temperado e revenido, permitindo uma boa combinação entre resistência e tenacidade, com dureza próxima à do corpo de prova utilizado na primeira etapa. O aço ABNT 4340 apresenta ainda boa resistência à fadiga e é amplamente empregado na confecção de dispositivos e peças sujeitas a cargas altas e periódicas, em engrenagens de avião e em peças para a aeronáutica, eixos virabrequins e muitas outras aplicações industriais. A

composição química deste material, fornecida pela GERDAU Aços Finos Piratini é apresentada na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química do aço ABNT 4340 (%)

C	0,4	S	0,011	Al	0,016
Mn	0,77	Cr	0,81	Cu	0,18
P	0,026	Ni	1,71	Co	0,04
Si	0,30	Mo	0,22	Fe	Balanço

Ressalta-se que os corpos de prova foram confeccionados, na Oficina Mecânica da UNESP de Bauru, respeitando-se as tolerâncias pré-determinadas. A figura 3.7 apresenta o corpo de prova que foi utilizado na segunda etapa desta pesquisa com diâmetro externo de 53,8mm , diâmetro interno de 38mm e largura de 25mm.



Figura 3.7 – Corpo de prova definitivo.

Após a confecção dos corpos de prova, os mesmos foram submetidos ao tratamento térmico de têmpera em banho de sal executada em forno elétrico, a temperatura de 860 °C durante 1 hora e revenimento (a temperatura de 160°C durante 2 horas) pela empresa Brasimet Indústria e Comércio Ltda. passando a possuir uma dureza média de 52 HRc.

3.1.2 Seleção da ferramenta

Após a fixação do corpo de prova, procedeu-se a seleção da ferramenta abrasiva em função do diâmetro da haste e do rebolo propriamente dito. No primeiro lote de rebolos encomendado à NIKKON, empresa que se propôs a fornecer as ferramentas necessárias para a execução do trabalho, solicitou-se, que os mesmos fossem confeccionados com grãos de CBN e ligante vitrificado, com 16mm de diâmetro e 15mm de largura de corte, com a especificação SNB151Q12VR2. Optou-se por uma haste de 4mm de diâmetro, necessitando para isto, utilizar a pinça de 4mm. Tinha-se ainda como opção, utilizar hastes com 3 e 6mm de diâmetro, por serem estas as dimensões das pinças disponíveis. Na figura 3.8 pode-se visualizar a fixação do rebolo no cabeçote retificador.

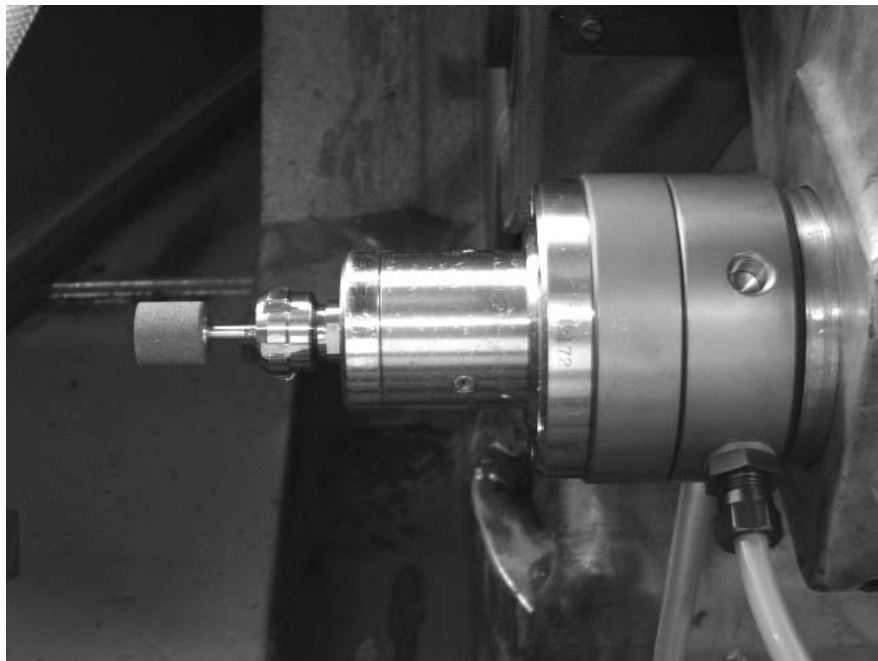


Figura 3.8 – Fixação do rebolo no cabeçote retificador.

O rebolo especificado não foi adequado, pelo fato de possuir uma haste muito delgada proporcionalmente à massa do corpo do rebolo, o qual apresentava batimento radial superior a 10 μ m, aferido por meio de relógio comparador. Tal fato associado à elevada rotação do cabeçote, proporcionou uma intensa solicitação de flexão da haste do

rebolo, fato que em poucos segundos resultou no rompimento da mesma conforme pode-se observar na figura 3.9.

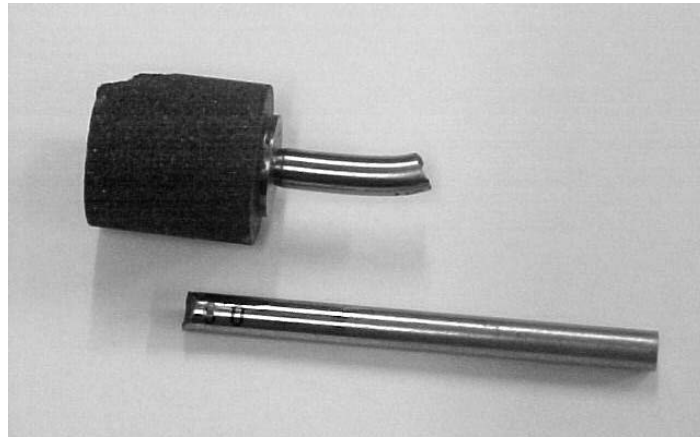


Figura 3.9 – Foto da haste rompida devido aos intensos esforços de flexão.

Diante de tal fato, optou-se pela utilização de rebolos com haste de 6mm (diâmetro máximo admitido pelo cabeçote), constituída ainda com um reforço estrutural (contra o flexionamento da haste) na área externa a pinça conforme pode-se observar na figura 3.10. Este rebolo apresenta diâmetro de 12mm e 15mm de largura de corte. Devido as dimensões do rebolo e da pinça, definiu-se em consenso com o fabricante do cabeçote que deveria ser utilizada uma pressão menor de ar comprimido para alimentação do mesmo, visando reduzir a rotação do rebolo. Este assunto será abordado com mais detalhes em seguida.

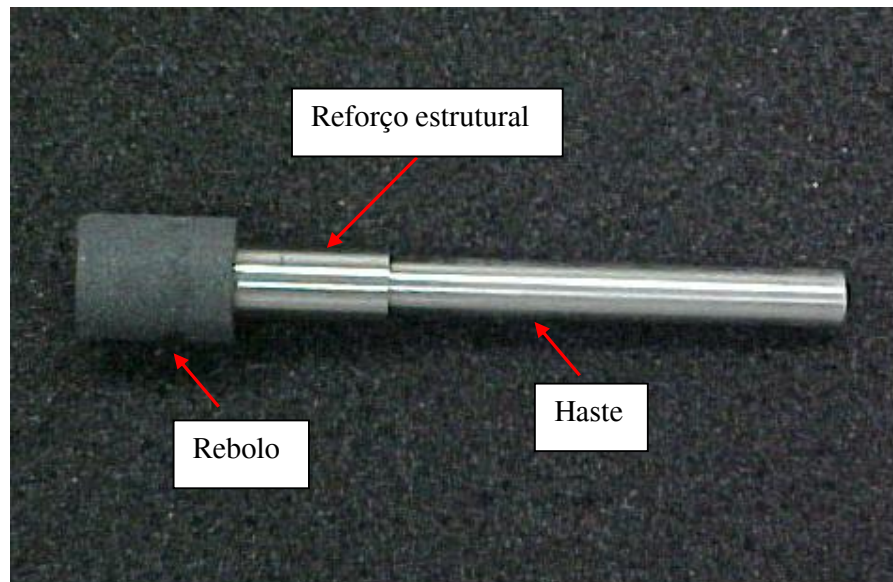


Figura 3.10 – Ferramenta abrasiva de CBN utilizada para a execução dos ensaios.

3.1.3 O Cabeçote retificador

O cabeçote adquirido para a execução dos ensaios é alimentado por ar comprimido, o qual aciona um mancal aerostático responsável por fazer o eixo girar. A necessidade de alimentação do cabeçote retificador com ar comprimido tornou necessária a aquisição de um compressor com capacidade de vazão de $30\text{pés}^3/\text{min}$, para trabalhar simultaneamente a um outro, já em operação no laboratório, com capacidade de vazão de $15\text{pés}^3/\text{min}$, sendo este último destinado à alimentação do sistema de MQL. Deste modo, o compressor de maior potência foi utilizado exclusivamente para a alimentação do cabeçote retificador e o de menor potência ficou reservado ao sistema de MQL, evitando, desta forma, queda de pressão que pudesse prejudicar qualquer um dos sistemas.

O ar comprimido advindo do compressor passa por uma unidade de filtragem e lubrificação, composta por um filtro decantador de água e impurezas, um regulador de pressão com manômetro, um lubrificador que dosa e mistura o óleo e também por uma válvula de abertura e fechamento (figura 3.11). Desta forma foi possível fazer com que o ar chegasse até o mancal do cabeçote com a pressão desejada, limpo e seco, com a dosagem adequada de óleo lubrificante (o óleo recomendado pelo fabricante é o Shell Morlina-10). Para calibrar o dosador seguiu-se as especificações do fabricante

estabelecendo um gotejamento de cerca de 25 gotas de óleo por minuto na linha que alimenta o cabeçote. A rotação do rebolo neste cabeçote foi definida de acordo com a pressão adotada. Uma pressão de 4kgf/cm^2 , empregada para rebolos com até 8mm de diâmetro, garantiu uma rotação aproximadamente 53.000rpm, enquanto que com uma pressão de 2kg/cm^2 (valor mínimo) atingiu-se uma rotação de aproximadamente 41.000rpm, sendo esta a empregada para o rebolo de 12 mm de diâmetro, garantindo a ferramenta uma velocidade tangencial de aproximadamente 27,0 m/s.

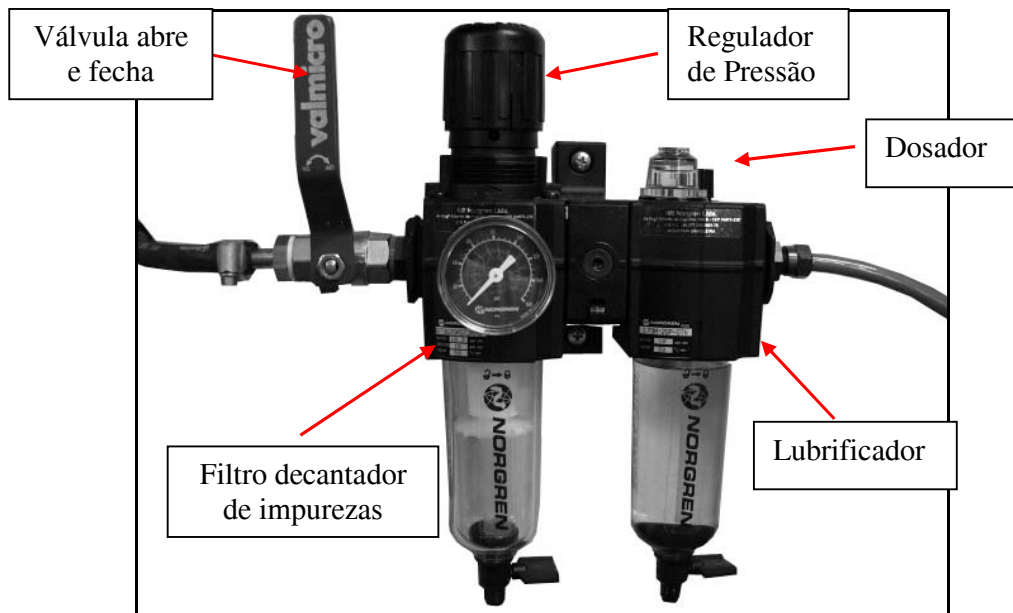


Figura 3.11 – Unidade de filtragem e lubrificação do ar comprimido.

3.1.4 Medição da rotação do rebolo

Para aferir a rotação atingida pelo cabeçote adquiriu-se um tacômetro óptico da marca Instruterm, modelo TDR-800, o qual faz a medição por meio da emissão de um feixe de luz infravermelha que incide sobre uma fita reflexiva adequadamente fixada sobre a superfície em movimento. A cada rotação a luz incide sobre a fita e é refletida para o tacômetro, possibilitando a medição. Inicialmente tinha-se o objetivo de fixar esta fita em uma região neutra do cabeçote, de modo a não interferir na operação de retificação, buscando monitorar a rotação em tempo real durante todo o processo. No entanto, as dimensões da fita necessárias para a efetuação da medição eram maiores do que as dimensões das áreas disponíveis no rebolo. Nesta situação, optou-se por fixar a

fita sobre a superfície de corte de um rebolo já desgastado, que passou então a ser utilizado apenas para realizar a aferição da rotação, conforme figura 3.12. A cada vez em que se fazia necessário alterar a pressão do ar comprimido na válvula abre e fecha, acoplava-se o referido rebolo no cabeçote e media-se a rotação obtida. Desta forma, não foi possível quantificar a diminuição da rotação do rebolo ocorrida nos momentos de avanço da ferramenta contra a peça.

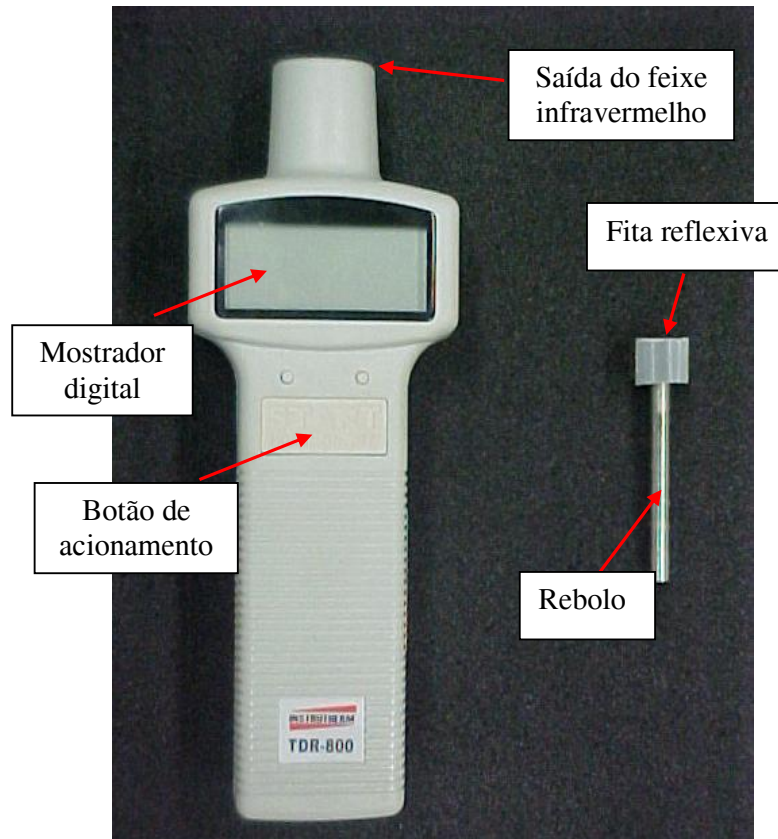


Figura 3.12 – Tacômetro óptico e rebolo com a fita reflexiva utilizados para a medição da rotação obtida no cabeçote retificador.

Na figura 3.13 pode-se visualizar a medição da rotação do cabeçote retificador. Tomou-se efetiva cautela para a execução de tal medição. Isso porque o tacômetro é bastante sensível a deslocamentos, podendo proporcionar resultados inverídicos. Logo, direcionava-se o feixe na direção da fita e aguardava-se até a estabilização do valor de rotação exibido no mostrador digital do tacômetro. Este procedimento foi realizado antes do início de cada ensaio.



Figura 3.13 – Medição da rotação do cabeçote retificador.

3.1.5 Medição do Sinal de Emissão Acústica

Inicialmente optou-se pela utilização de um sensor de emissão de acústica fluídico, através do qual flui uma baixa vazão de fluido de corte direcionado à zona de corte ou a regiões próximas desta. Deste modo, os sinais de emissão acústica gerados durante a remoção de material propagam-se pelo fluido e chegam até o sensor. Contudo, devido ao fato do trabalho envolver a técnica de MQL, tal sensor deveria ser posicionado em uma região que evitasse que tal fluido chegasse até a zona de corte, pois do contrário a presença de fluido de corte em ensaios de MQL comprometeria os resultados obtidos. Desta forma, optou-se pelo posicionamento do sensor de modo que o fluido colidisse sobre o eixo (cone Morse) do suporte de fixação. Este posicionamento,

embora impedisse que o fluido de corte chegasse até a região de corte, foi prejudicado pelo fato de estar muito distante da região onde os sinais eram gerados. Tal fato aliado à pouca sensibilidade do sensor, verificada em alguns testes preliminares, impossibilitou a obtenção de valores coerentes do sinal de emissão acústica. É possível que a eficácia de tal sensor esteja relacionada à não utilização de um tipo específico de fluido, no caso, o óleo integral, fluido capaz de garantir um fluxo laminar e isento de bolhas, condições indispensáveis para a captação do sinal de emissão acústica neste tipo de equipamento. Na figura 3.14 apresenta-se o sensor de emissão acústica fluídico.

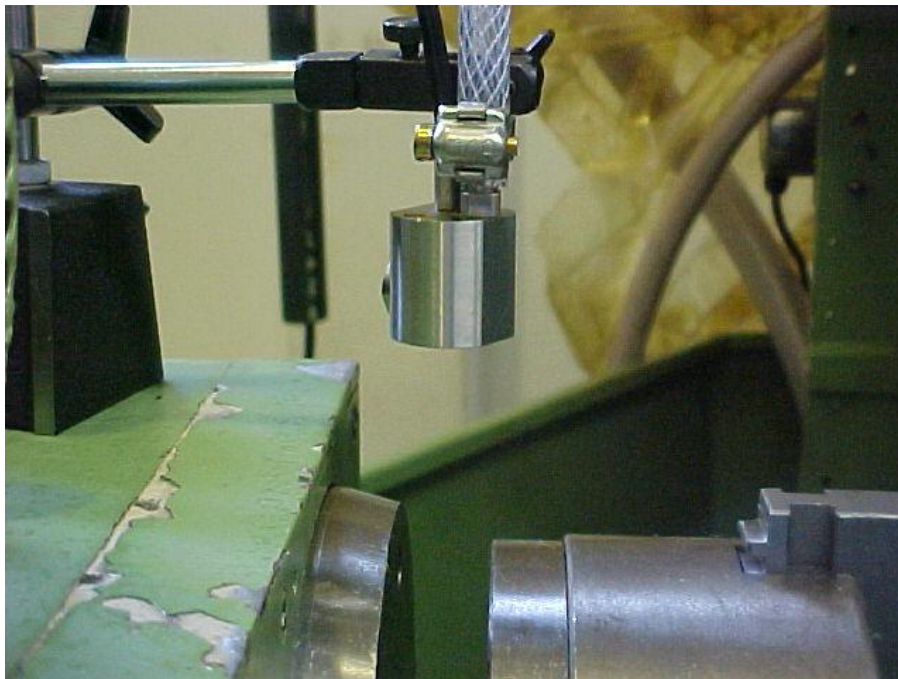


Figura 3.14 – Sensor de emissão acústica fluídico.

Na figura 3.15 pode-se visualizar a face inferior do sensor.

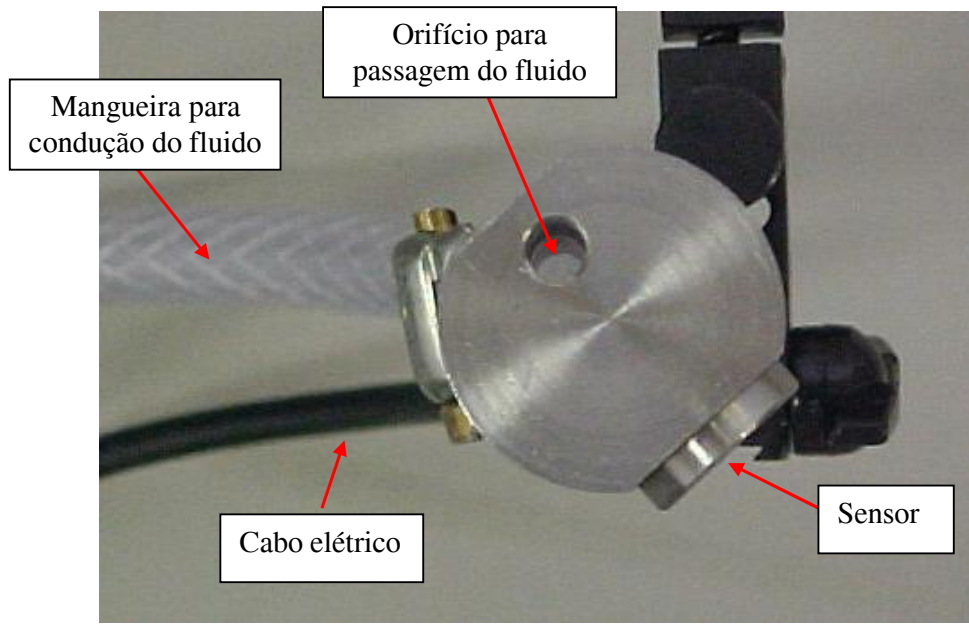


Figura 3.15 – Vista da face inferior do sensor de emissão acústica fluídico.

Diante destas circunstâncias, optou-se pela utilização de um sensor convencional de emissão acústica. No entanto, novamente confrontou-se com o grande inconveniente da operação de retificação interna: o difícil acesso à região de corte. Decidiu-se então pela confecção de um suporte para o sensor que possibilitasse o seu acoplamento diretamente sobre o cabeçote retificador. O sinal foi observado instalando-se um osciloscópio na saída de uma unidade de tratamento do sinal de emissão acústica, da marca Sensis, modelo DM42, apresentado na figura 3.16. Fez-se diversas alterações no ganho de sinal deste aparelho, buscando-se uma filtragem adequada do sinal. No entanto tais tentativas não proporcionaram a obtenção de resultados satisfatórios.



Figura 3.16 - Unidade de tratamento do sinal de emissão acústica.

Na figura 3.17 pode-se observar o sensor de emissão acústica acoplado ao suporte, o qual possibilitou a sua fixação diretamente sobre o cabeçote retificador (figura 3.18).

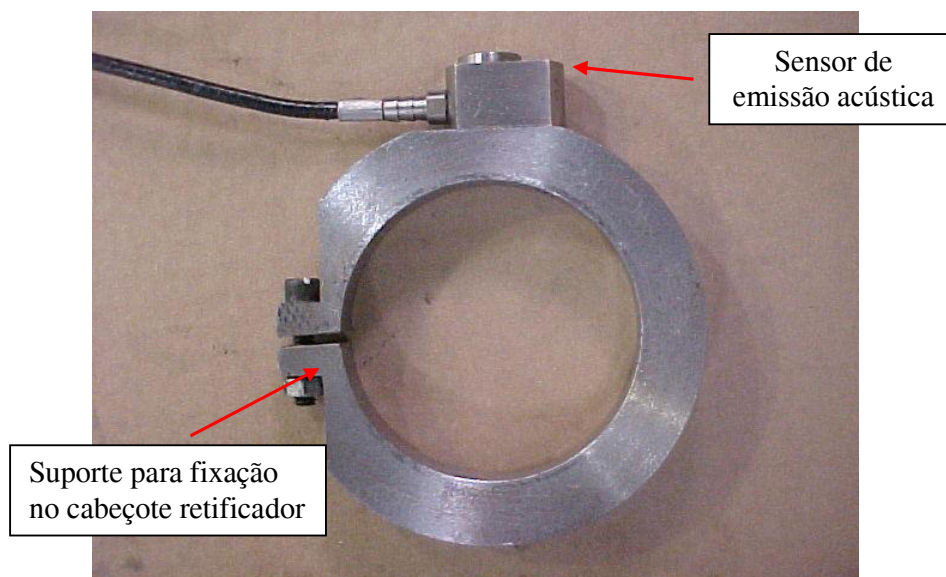


Figura 3.17 – Sensor de emissão acústica acoplado ao suporte construído para ser fixado ao cabeçote retificador.

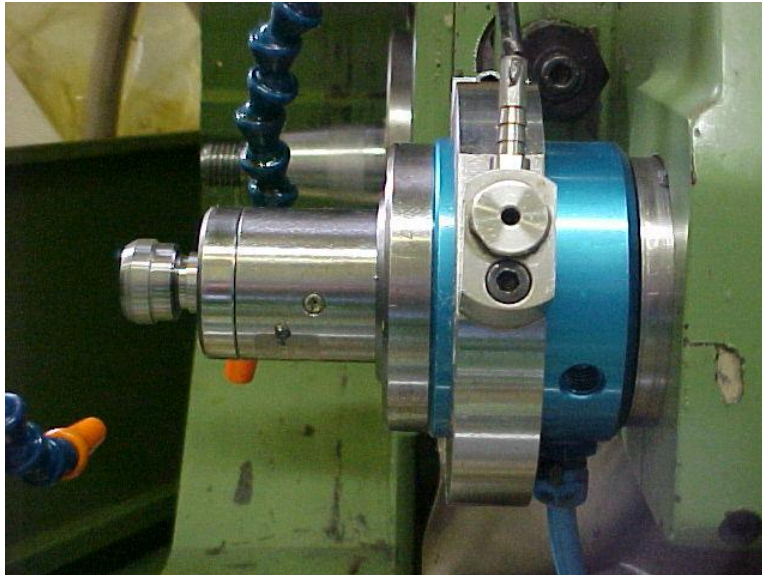


Figura 3.18 – Sensor de emissão acústica fixado sobre o corpo do cabeçote retificador.

Mediante a realização de novos testes, verificou-se novamente a impossibilidade de capturar o sinal de emissão acústica, devido à interferência dos ruídos gerados pelo mancal do cabeçote de intensidade bastante elevada, impossibilitando a filtragem do sinal, resultando em um sinal praticamente constante, sem alteração perceptível nem mesmo nos instantes correspondentes à remoção de material.

3.1.6 Sentido de avanço do rebolo

Tendo em vista a possibilidade de se efetuar a retificação na face interna anterior e posterior da peça, ambos no sentido concordante, optou-se por averiguar o desempenho de ambas as faces, avaliando qual posição possibilitaria a obtenção de uma melhor qualidade superficial em função do sentido de avanço do rebolo.

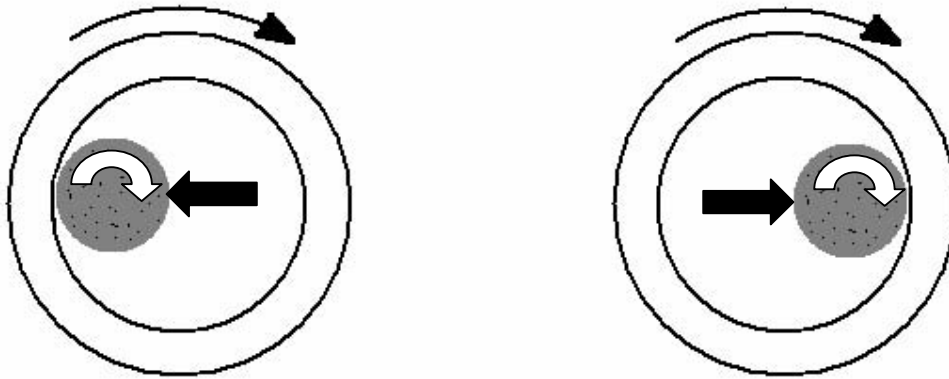


Figura 3.19 – Esquemática dos sentidos de avanço do rebolo.

Após a execução dos testes não se observou diferença significativa entre os dois métodos. Desta forma, a escolha da face usinada pôde ser definida em função da facilidade de alocação do bocal convencional e principalmente dos bocais otimizado e de MQL, os quais requerem um posicionamento mais cuidadoso de modo a evitar possíveis colisões.

3.1.7 A Técnica de MQL

A dosagem do óleo lubrificante e a regulação fina de ar comprimido são feitos na mesma unidade de controle, da marca Accu-lube, modelo 79053D que pode ser visualizado na figura 3.20.

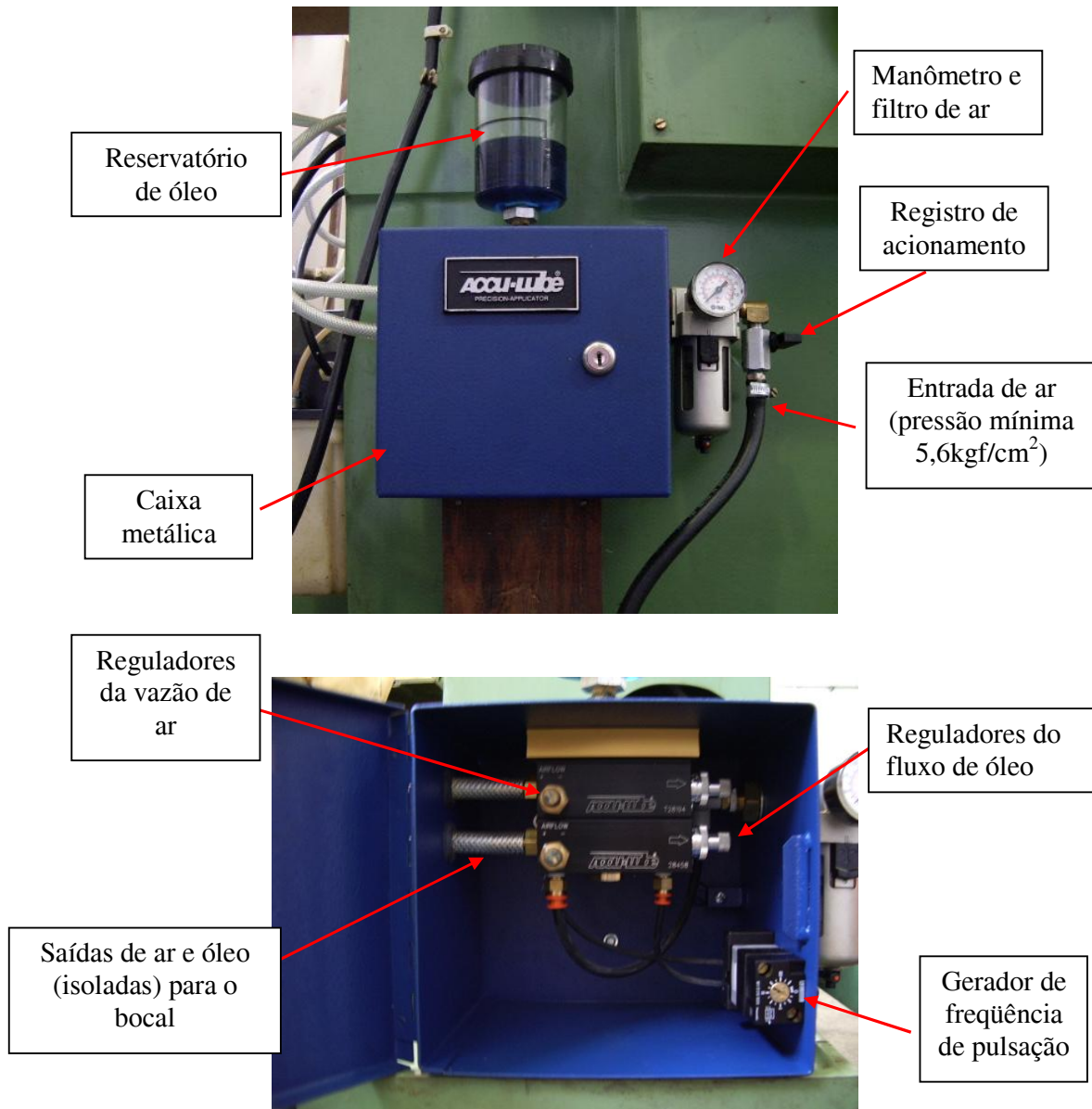


Figura 3.20 – Componentes da unidade de controle do equipamento de MQL.

A medição da vazão foi feita conectando-se um medidor de vazão modelo SVTG fabricado pela empresa Contech, à rede de ar comprimido, fornecendo diretamente através do visor a leitura da vazão em m³/hora. Este medidor é do tipo turbina, capaz de gerar um campo magnético em função da rotação da turbina. O medidor de vazão foi calibrado para ser utilizado a uma pressão de 8kgf/cm², valor mantido constante durante os ensaios.

Confeccionou-se um bocal específico para aplicação desta técnica. Desta forma foi possível alcançar uma velocidade do ar comprimido aproximadamente igual a

velocidade periférica do rebolo. Tal relação é importante para que a mistura ar-óleo penetre adequadamente até a região de corte sem perda de velocidade e pressão.

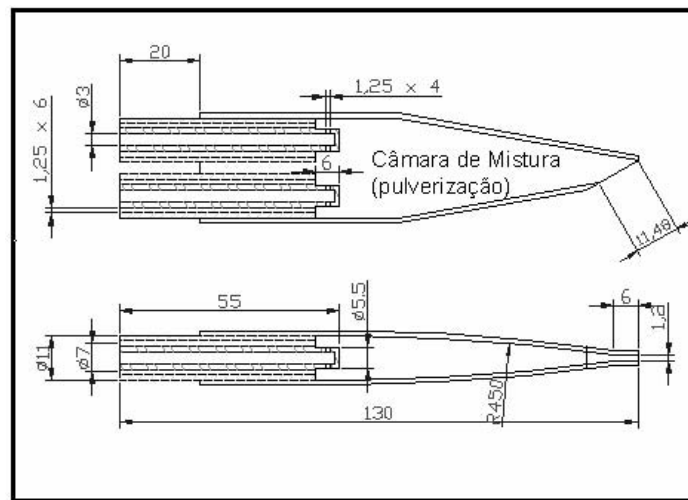


Figura 3.21 – Projeto do bocal de MQL.

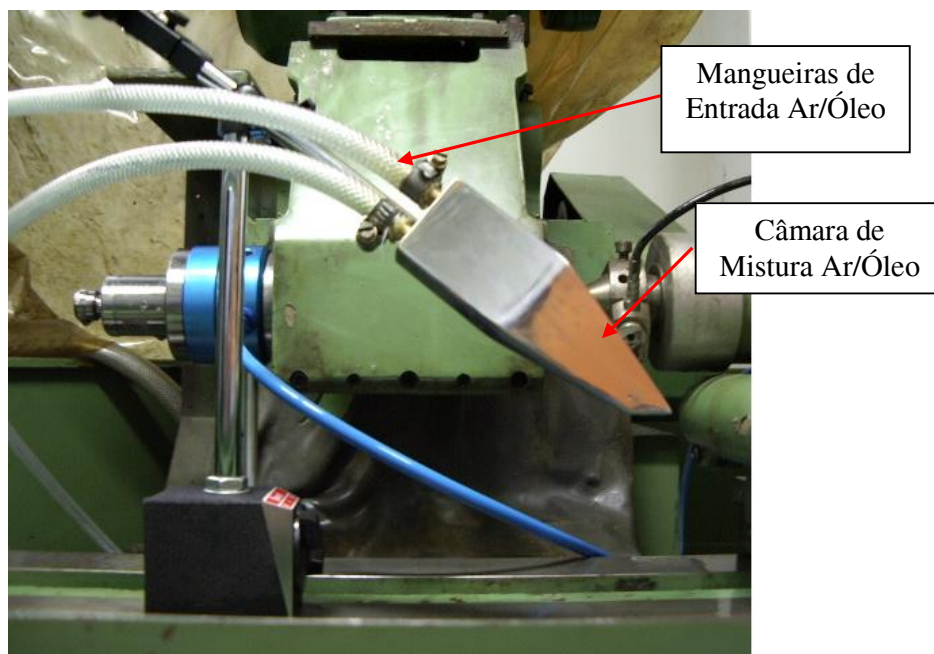


Figura 3.22 – Bocal empregado na técnica de MQL.

A câmara de mistura observada nas figuras 3.21 e 3.22 são de fundamental importância para garantir que o ar comprimido se misture ao óleo lubrificante antes da passagem pelo orifício de saída do bocal.

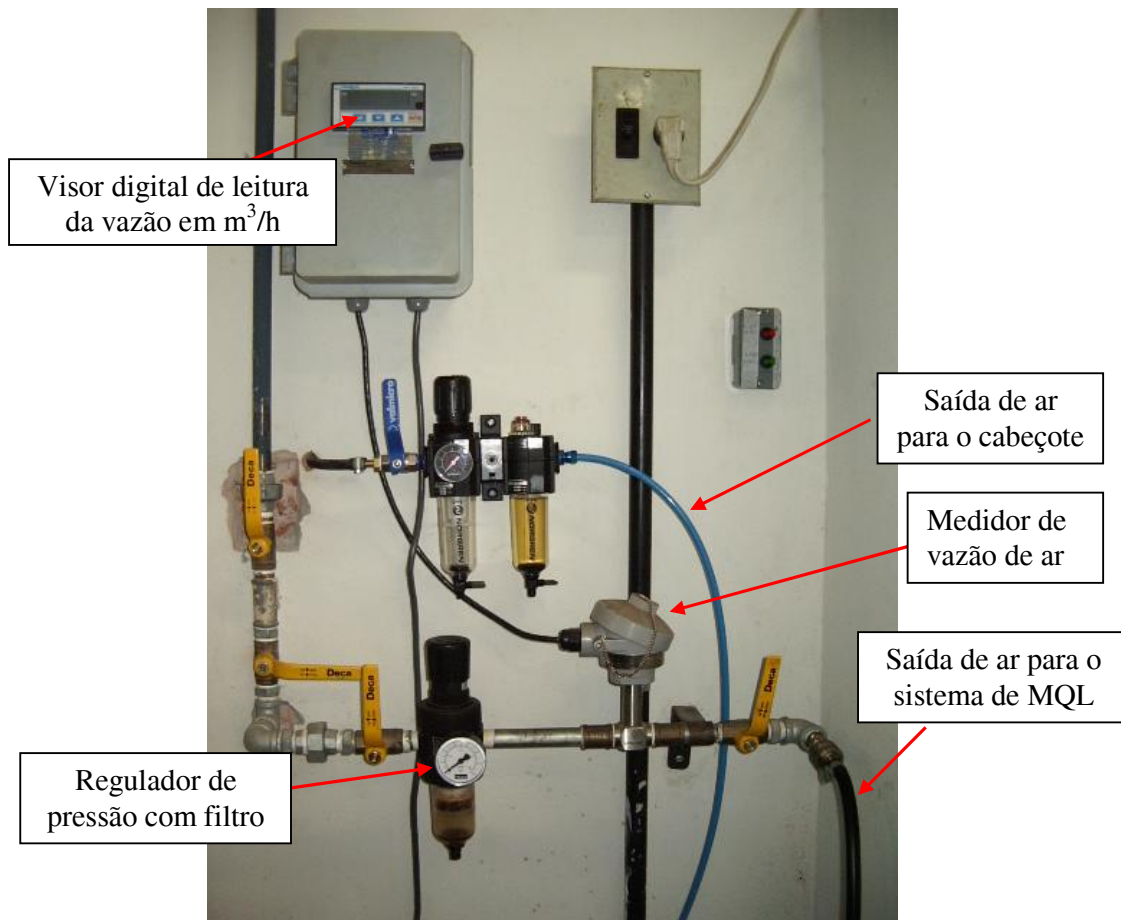


Figura 3.23 – Medidor de vazão de ar e reguladores de pressão utilizado na experimentação com MQL e na alimentação do cabeçote retificador.

3.1.8 Preparação dos fluidos de corte

O fluido de corte sintético (empregado no método otimizado e convencional de lubri-refrigeração) foi preparado objetivando-se obter concentração de 5%, seguindo a recomendação do fabricante. Para isso, diluiu-se cerca de 4,5 litros de óleo em 90 litros de água contidos no reservatório, conforme pode-se observar na figura 3.24.



Figura 3.24 – Reservatório de fluido de corte para ser utilizado no método convencional de lubri-refrigeração.

Tal emulsão apresentou inicialmente um valor de pH igual a 7,8. No entanto, devido à ação de bactérias e fungos, o pH da emulsão apresentou uma pequena queda com o passar dos dias. Fez-se necessário em alguns momentos, adicionar água à emulsão a fim de manter a concentração dentro dos patamares desejados. Adotou-se tais valores por recomendação dos fabricantes. Para a medição da concentração utilizou-se um refratômetro manual de bolso, da marca ATAGO modelo N-1E. Já o pH pôde ser aferido utilizando-se um peagâmetro portátil, da marca Hanna, modelo Checker. É importante salientar que estes dois equipamentos foram previamente calibrados no Laboratório de Química da UNESP, campus de Bauru. O refratômetro e o peagâmetro podem ser visualizados na figura 3.25.

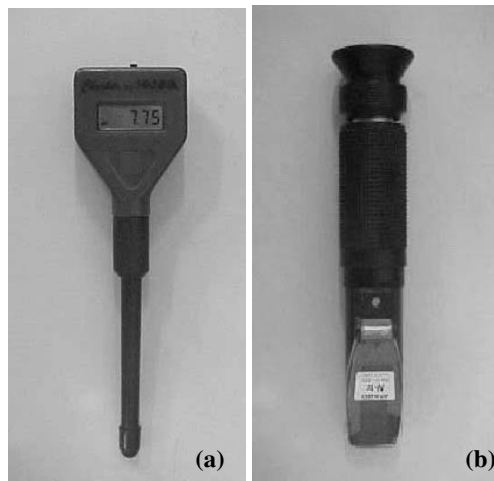


Figura 3.25 – Equipamentos utilizados para o monitoramento do fluido de corte:

(a) peagâmetro (b) refratômetro.

3.1.9 O método Convencional de lubri-refrigeração

Objetivando-se alcançar uma relação unitária (de aproximadamente 30 m/s) entre a velocidade tangencial do rebolo e velocidade de saída do jato de fluido, constatou-se, que a vazão adotada para o método convencional de lubri-refrigeração deveria ser de 25 litros por minuto a uma pressão de 5 kgf/cm². No entanto, tal vazão foi responsável por ocasionar uma força excessiva incapaz de ser suportada pelas mangueiras de encaixe do bocal convencional resultando no rompimento das mesmas. Tais mangueiras são apresentadas na figura 3.26. Acredita-se a fragilidade das mangueiras deveu-se ao seu grande comprimento e ao formato, irregular e com muitas dobras, requerido para alcançar adequadamente a região de corte. Além disso a vazão de 25 l/min ocasionou uma inundação demasiada da região de corte, fazendo com que o jato de fluido incidisse também no sentido contrário ao de rotação do rebolo. Isto resultou em uma espécie de frenagem do mesmo, pelo fato de ser alimentado por uma linha pneumática incapaz de fornecer torque necessário nos momentos críticos. Desta forma, optou-se por ponderar uma vazão que pudesse ser suportada pelas mangueiras difusoras e que convergisse o jato de modo a direcioná-lo exclusivamente no sentido concordante ao de rotação do rebolo, definida em 15 litros por minuto a pressão de 5kgf/cm².

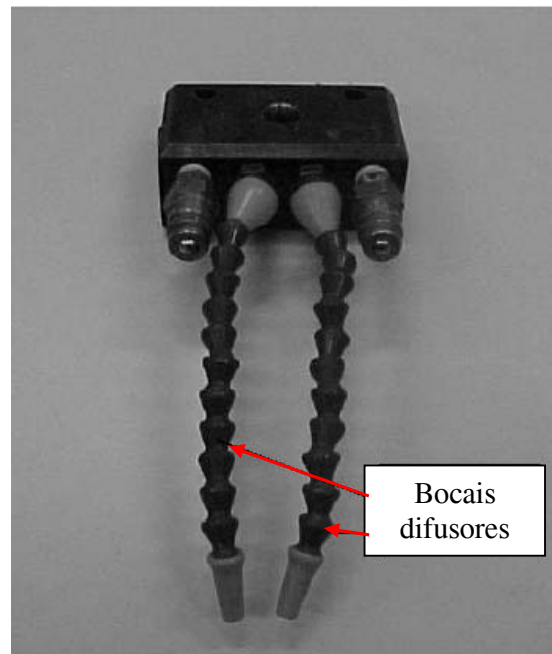


Figura 3.26 – Mangueiras utilizadas no método convencional de lubri-refrigeração.

Na figura 3.27 pode-se visualizar a operação de retificação interna de mergulho empregando-se a técnica convencional de lubri-refrigeração.



Figura 3.27 – Operação de retificação interna empregando-se a técnica convencional de lubri-refrigeração.

3.1.10 O Método Otimizado de Lubri-refrigeração

O modelo otimizado de aplicação de fluidos de corte, baseado no bocal desenvolvido por Webster et al. (1995), é apresentado na figura 3.28.

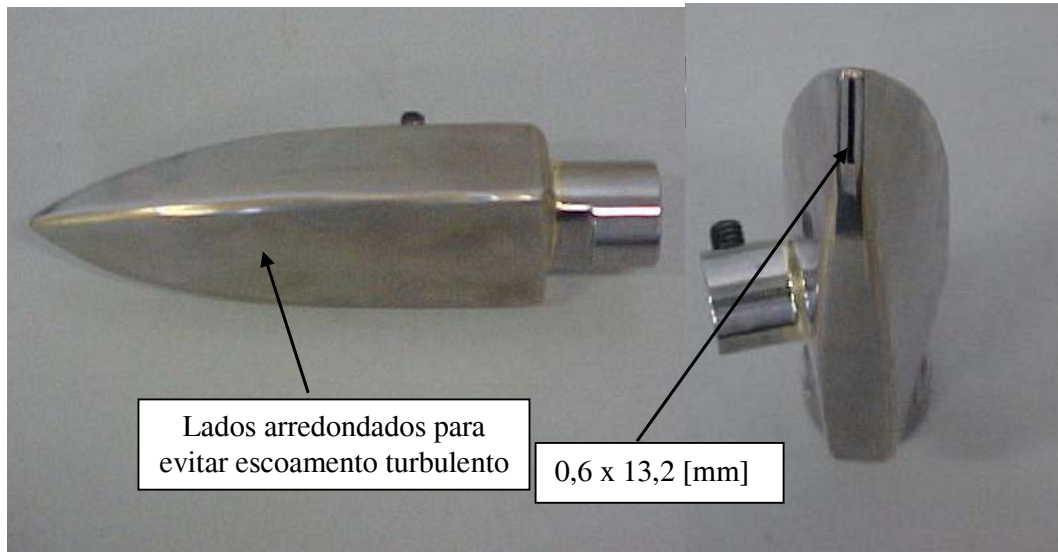


Figura 3.28 – Bocal otimizado elaborado para a operação de retificação interna.

As medidas do orifício de saída do bocal foram calculadas a fim de se obter área equivalente a do bocal arredondado com 3 mm de diâmetro utilizado no trabalho de Mestrado do Engenheiro Rodrigo Daun Monici (de aproximadamente $7,92 \text{ mm}^2$). Além disso, levou-se em consideração o comprimento da face do rebolo para determinação da dimensão do maior lado, objetivando atingir toda a região de corte.

A vazão de fluido de corte passando pelo bocal de aplicação do fluido pôde ser ajustada por meio do registro de esfera posicionado antes do bico de saída do fluido de corte. A medida que se abria ou fechava o registro, o valor da vazão era aferido e apresentado no visor do aparelho medidor de vazão modelo SVTG fabricado pela empresa Contech, o qual foi conectado logo na saída da bomba, conforme mostrado na figura 3.29. Este medidor de vazão do tipo turbina fornece uma leitura direta da vazão em litros/minuto. O funcionamento ocorre por meio de um campo magnético que é gerado de acordo com a rotação da turbina. Este campo magnético é captado por sensor posicionado logo acima da turbina do medidor e a vazão é mostrada no visor de leitura do aparelho. A vazão utilizada foi determinada, assim como para os outros métodos, em função da velocidade de saída do fluido, de modo a se obter uma relação próxima da

unitária com a velocidade tangencial do rebolo, estabelecida em aproximadamente 13 litros por minuto.

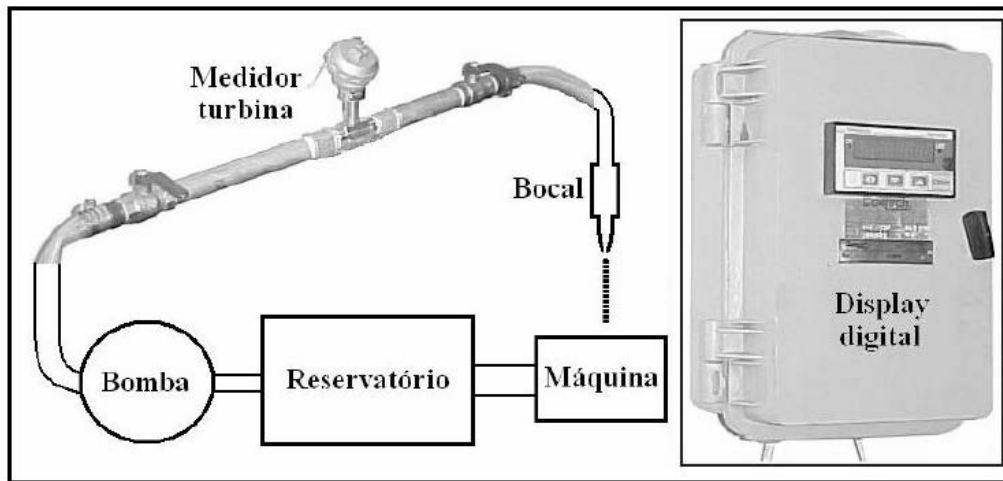


Figura 3.29 – Medidor de vazão, em l/min, para o controle do fluxo de fluido de corte.

3.2 Classificação dos ensaios

Este trabalho foi desenvolvido em duas etapas. Na primeira etapa efetuou-se ensaios empregando-se a técnica de MQL. Cabe ressaltar que nesta primeira etapa do trabalho teve-se o intuito de verificar a viabilidade de tal técnica aplicada ao processo de retificação. Por este motivo optou-se por averiguar o comportamento do processo diante da variação de vazões de óleo para o modelo em questão. Utilizou-se para a técnica de MQL três vazões distintas de óleo: 48ml/h, 60ml/h e 80ml/h, mantendo a vazão de ar constante em 30 m³ por hora. Tinha-se inicialmente a intenção de empregar a menor vazão de óleo igual a 40ml/h, no entanto não foi possível calibrar o aparelho para tal vazão, pelo fato desta estar abaixo da vazão mínima proporcionada pelo aparelho de MQL. Efetuou-se cinco repetibilidades para cada vazão de óleo empregada, totalizando, nesta etapa, 15 ensaios. Na segunda parte do trabalho, diante da constatação da inviabilidade de executar novos ensaios empregando a técnica de MQL por meio da análise de resultados, optou-se por verificar a influência da taxa de avanço no processo equipado com o método otimizado e convencional de lubri-refrigeração. Manteve-se o número de repetibilidades igual a cinco para cada método de lubri-refrigeração/taxa de avanço empregada. Assim, nesta etapa retificou-se 30 corpos de prova, sendo os 15

primeiros submetidos ao método otimizado de lubri-refrigeração, com vazão de 13 litros por minuto. Os 15 ensaios subsequentes foram submetidos ao método convencional, com vazão de 15 litros por minuto. Na tabela 3.2 é feita a classificação de todos os ensaios executados neste trabalho.

Tabela 3.2 – Classificação e cronologia dos ensaios

Ensaio	Vazão de Fluido [l/min]		Taxa de Avanço [mm/min]	Método de Lubri-refrigeração
	Ar [m ³ /hora]	Óleo [ml/hora]		
1	30	48	2,0	MQL
2	30	60	2,0	MQL
3	30	80	2,0	MQL
4	13		2,0	Otimizado
5	13		1,5	Otimizado
6	13		1,0	Otimizado
7	15		2,0	Convencional
8	15		1,5	Convencional
9	15		1,0	Convencional

3.3 Execução dos ensaios definitivos

3.3.1 A operação de dressagem e avivamento

A dressagem foi executada, aplicando-se 2kgf/cm² de pressão de ar comprimido ao cabeçote, que manteve uma rotação de aproximadamente 35.000rpm, evitando-se desta forma uma rotação excessiva do rebolo que pudesse danificar a sua superfície. Utilizou-se um dressador do tipo conglomerado. O rebolo empregado na operação de uniformização da peça, apresentava as mesmas características do rebolo empregado na

operação de retificação efetiva, a não ser pelo fato de apresentar ligante resinóide. Rebolos com este tipo de ligante necessitam passar por uma operação de avivamento dos grãos, após a dressagem/perfilamento. Isto garante uma maior exposição dos grãos acima da camada do ligante. O avivamento foi feito pressionando-se um rebolo de Óxido de Alumínio contra o a face do rebolo.

3.3.2 Procedimentos padrões adotados antes de cada ensaio

A seguir é descrita a relação dos procedimentos gerais seguidos para a realização de todos os ensaios.

1. Seleção dos parâmetros de entrada e do método de lubri-refrigeração a ser empregado de acordo com o ensaio a ser executado, baseando-se na tabela 3.1;
2. Fixação no cabeçote retificador do rebolo a ser empregado na uniformização prévia do corpo de prova. Optou-se pela execução da uniformização visando eliminar excentricidades da peça oriundas da operação de torneamento.
3. Posicionamento do bocal a uma distância e angulação adequadas para garantir que o fluido de corte chegasse à região de corte.
4. Verificação da concentração e do pH do fluido de corte (específico para o método convencional de lubri-refrigeração), buscando manter estes parâmetros sempre constantes para evitar uma interferência destes fatores nos resultados obtidos;
5. Inserção dos parâmetros de corte e tempos de *spark-out* no programa CNC da máquina retificadora;
6. Fixação no cabeçote retificador do rebolo para a execução do ensaio.

3.3.3 Procedimentos executados durante a realização dos ensaios

Neste item será feito um detalhamento dos procedimentos empregados para a execução de cada ensaio.

1º Passo – Dressagem da ferramenta abrasiva, retirando-se 2 μ m por passada do dressador, executando-se, por dressagem, 10 passadas do dressador, removendo-se

desta forma 20 μ m do raio do rebolo. Como o deslocamento da mesa é feito manualmente, cautelosamente procurou-se executar cuidadosamente os deslocamentos com velocidade constante;

2º Passo – Fixação do corpo de prova na castanha da máquina retificadora, ou no suporte fixador (dependendo do corpo de prova utilizado), deslocando em seguida o rebolo para a posição (faixa) de retificação;

3º Passo – Inicialização do programa CNC da máquina para a execução da uniformização inicial das peças. Nesta operação removeu-se 1 mm do raio da peça (por meio da execução de 250 ciclos de retificação). Esta operação prévia assegurava que as dimensões iniciais da peça fossem aproximadamente as mesmas, para evitar solicitações excessivas em determinadas partes do rebolo;

4º Passo – Substituição do rebolo de uniformização pelo rebolo utilizado na aferição da rotação do rebolo. Empregando-se o tacômetro, verificava-se se a rotação do rebolo estava adequada a pressão imposta ao sistema.

5º Passo – Substituição do rebolo de aferição pelo rebolo a ser utilizado no ensaio. Após a fixação deste rebolo, executava-se na seqüência sua dressagem, buscando eliminar possíveis batimentos radiais capazes de gerar esforços flexionais na haste do mesmo;

6º Passo – Inicialização do programa de CNC, para a execução do ensaio propriamente dito. Na **primeira etapa** do trabalho, executou-se 60 ciclos de 8 μ m de avanço radial (ou mergulho), removendo 480 μ m no raio interno da peça. Em seguida, afastava-se o rebolo da região de corte, limpava-se a superfície retificada com Tetracloreto de Carbono, substância eficaz na remoção de partículas. Com o objetivo de se obter melhor controle do processo, optou-se por monitorar os valores de rugosidade a cada vinte ciclos de retificação. As medições de rugosidade foram feitas montando-se uma base sobre o barramento da retificadora, a qual permitiu correto posicionamento do rugosímetro. Efetuou-se cinco medições de rugosidade, em regiões distintas da superfície ao redor do perímetro da peça. O mesmo procedimento não pode ser adotado para a medição dos desvios de circularidade, devido ao fato de que a remoção da peça da castanha implicaria em perdas das referências, descaracterizando uma operação contínua de 60 ciclos. Na segunda etapa do trabalho, executou-se 60 ciclos de 4 μ m de avanço radial (ou mergulho), resultando em uma redução de 240 μ m no raio interno da peça.

Diferentemente da primeira etapa, neste momento as medições de rugosidade foram executadas somente após a conclusão dos 60 ciclos.

7º Passo – Objetivando-se captar os valores de desgaste do rebolo, fixou-se na estrutura do dressador a lâmina de aço, na qual seria impresso o perfil do rebolo, procedendo-se em seguida avanços de $2\mu\text{m}$ sobre esta. No entanto, após diversas tentativas de captação e de análise no microscópio não foi possível constatar nenhum “degrau” efetivo na lâmina capaz de caracterizar e/ou quantificar o desgaste do rebolo. Diante da impossibilidade de obter êxito na medição desta variável, o procedimento descrito acima foi suspenso ao término do quinto ensaio.

8º Passo - Ao final da retificação dos 45 corpos de prova, passou-se para a medição das demais variáveis de saída.

3.3.4 Parâmetros de Usinagem

Os parâmetros de usinagem utilizados neste trabalho são:

$n_s = 43.000$ rpm (rotação do rebolo)

$D_s = 12,0$ mm (diâmetro do rebolo).

$V_s = 27,0$ m/s (velocidade periférica do rebolo).

$n_{w1} = n_{w2} = 810$ rpm.

$D_{w1} = 24,4$ mm (diâmetro interno da peça utilizado na primeira etapa).

$V_{w1} = 63,0$ m/min.

$D_{w2} = 38,0$ mm (diâmetro interno da peça utilizado na segunda etapa).

$V_{w2} = 96,6$ m/min.

3.3.5 Procedimentos adotados para a medição das variáveis de saída

3.3.5.1 Medição do desgaste diametral do rebolo

Para a medição do desgaste diametral do rebolo, posicionou-se o rebolo de modo que sua extremidade direita ficasse fora da peça, não participando do corte e não sofrendo nenhum tipo de desgaste, possibilitando desta forma, a sua utilização como referência para a medição do desgaste da face de trabalho do rebolo. Para a medição do

desgaste optou-se pela fixação de uma lâmina de aço na estrutura de fixação do dressador (base do dressador) de modo que a extremidade da lâmina incidisse perpendicularmente sobre a face do rebolo, conforme pode-se observar na figura 3.30. Após o contato, executou-se avanços manuais do rebolo contra a lâmina totalizando 20 μ m de avanço. Este procedimento foi feito a cada 20 ciclos do processo de retificação.

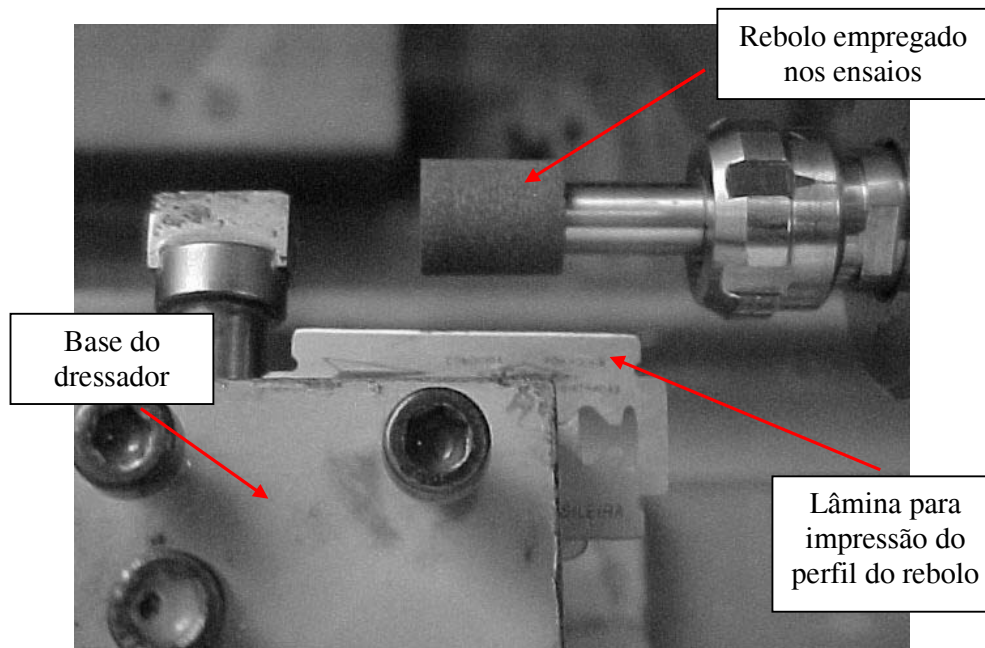


Figura 3.30 – Medição do desgaste diametral do rebolo.

Após a impressão do desgaste do rebolo na lâmina, observou-se a extremidade usinada da mesma para a verificação do desgaste obtido. Para isso utilizou-se um microscópio estereoscópico óptico da marca NIKON, modelo SMZ 800, para análise de desgaste da ferramenta, conectado a uma câmera digital de alta definição da marca COPI modelo DSP e placa processadora de imagens *PixelView Station 4* instalada em microcomputador. Tal equipamento está localizado no Laboratório da Tecnologia de Usinagem (LATUS), da UNESP *campus* de Bauru, cujo responsável, Prof. Dr. Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez, gentilmente permitiu sua utilização. No entanto, a análise da extremidade usinada da lâmina no microscópio não possibilitou a visualização do degrau existente entre as faces desgastadas e não desgastadas do rebolo. Diante de tal fato, aumentou-se o avanço do rebolo sobre a lâmina para 40 μ m a cada 20 ciclos de retificação. Esta mudança resultou num desgaste acentuado, porém não uniforme da

lâmina dificultando ainda mais a medição do desgaste da ferramenta abrasiva. Diante de tais fatos, conclui-se que para captação do desgaste do rebolo, o mesmo deve ser submetido a operações mais duradouras e com maior avanço ou ainda empregar uma lâmina mais espessa capaz de garantir maior rigidez.

3.3.5.2 Medidas de Rugosidade

Para execução das medidas de rugosidade utilizou-se um rugosímetro da marca Hank Taylor Robson®, modelo Surtronic 3+, apresentado na figura 3.31. O comprimento de medição (*cut-off*) utilizado foi de 0,8 mm e o filtro foi o 2CR- fase corrigida. O raio da ponta do diamante medidor de rugosidade foi de 0,2 μm .

Executou-se 5 medições para cada peça, sendo estas feitas em regiões distintas e equidistantes em relação ao perímetro da mesma. Com estes valores foi possível obter uma média aritmética e também um desvio-padrão, podendo-se então, disponibilizar os resultados referentes à rugosidade na forma de gráficos de barras. Tais gráficos serão apresentados no capítulo 4.

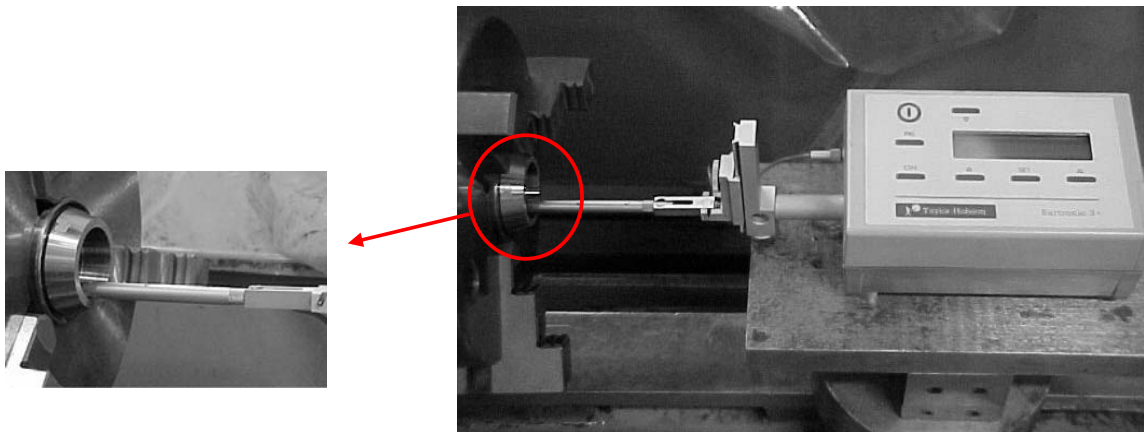


Figura 3.31 – Rugosímetro Taylor Hobson®, modelo Surtronic 3+, montado na retificadora, executando medições a cada 20 ciclos (primeira etapa)

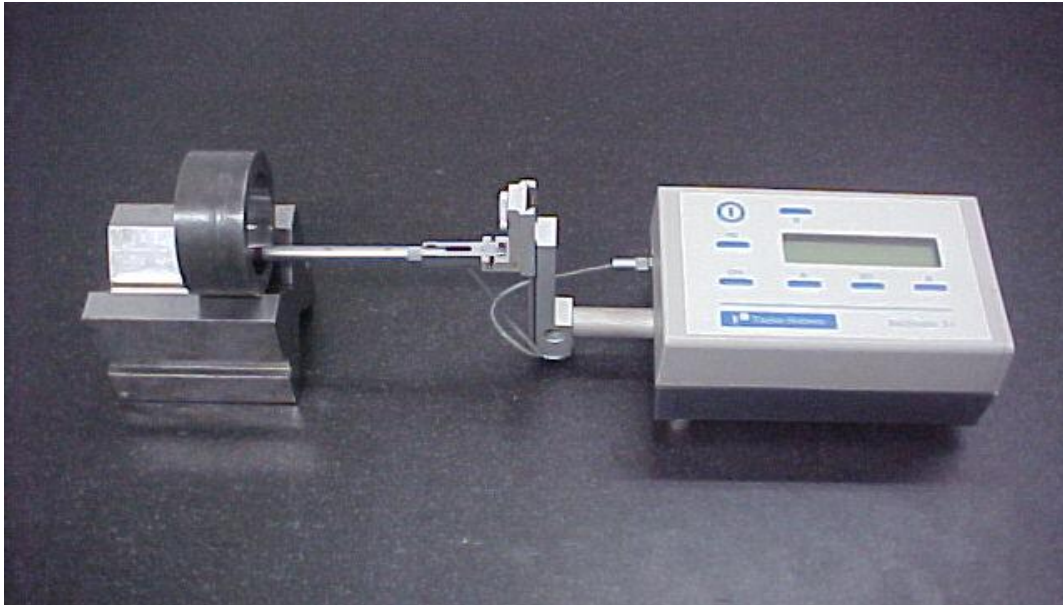


Figura 3.32 – Medição de rugosidade após a conclusão do ensaio (segunda etapa).

3.3.5.3 Medição dos desvios de Circularidade

As medidas dos desvios de circularidade foram feitas utilizando-se uma máquina específica para controle de tolerâncias geométricas e de forma, denominada TALYROND 31 C, da marca Taylor Robson®, a qual pode ser visualizada na figura 3.33.



Figura 3.33 – Aparelho TALYROND 31 C, Taylor Robson utilizado para medição dos desvios de circularidade.

Antes de cada medição as peças foram limpas com Tetracloreto de Carbono, responsável pela remoção de pequenas partículas que podiam interferir nos resultados.

As peças foram fixadas no aparelho através das castanhas da placa. Depois de fixada a peça, aproximava-se o apalpador, conforme figura 3.34 e então executava-se três medições em três posições verticais distintas do apalpador, executando o deslocamento de 2,0 mm da haste no eixo Z (vertical) da máquina entre cada medição.

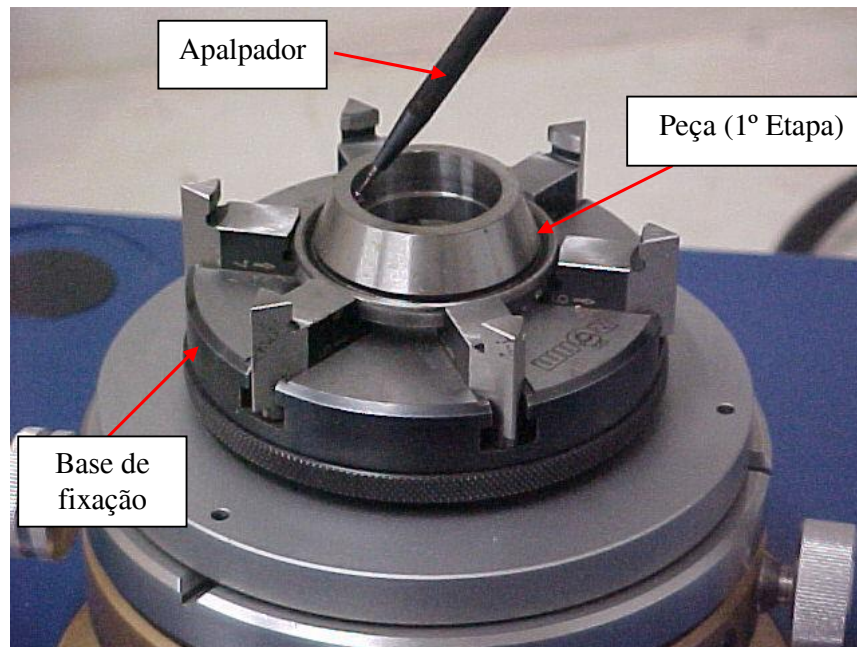


Figura 3.34 – Medição dos desvios de circularidade da peça retificada.

Os resultados referentes aos desvios de circularidade que serão apresentados no capítulo 4 estarão dispostos na forma de gráficos de barras com seus respectivos desvios padrões, sendo que cada barra corresponde a uma média aritmética dos valores obtidos nas 5 repetibilidades de cada condição de usinagem.

3.3.5.4 Preparação das amostras para análise

Ao final dos ensaios os corpos de prova utilizados para cada condição foram preparados, antes de serem submetidos às análises de MEV, microdureza e tensão residual. Foram cortadas duas partes como mostra a figura 3.35, utilizando para isto uma poliacorte e uma grande quantidade de fluido refrigerante visando impedir a formação de novas zonas termicamente afetadas.

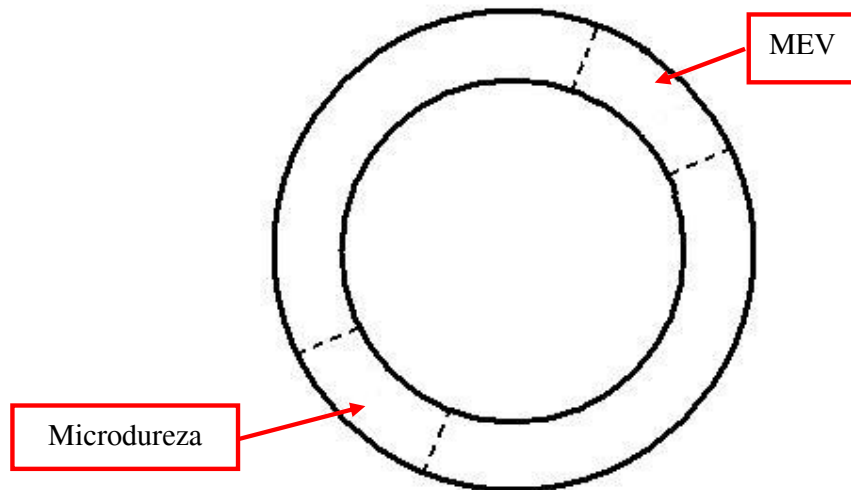


Figura 3.35 – Corte feitos no corpo de prova para preparação análise.

Após terem sido cortadas as amostras foram embutidas. Isto ocorreu, devido à necessidade de que as amostras submetidas à MEV e a microdureza fossem lixadas, polidas e atacadas quimicamente. Desta forma, lixou-se as amostras empregando-se lixas d'água com as seguintes granulometrias: 120, 220, 320, 400, 600, 1200 e 1400. Depois de lixadas, as peças embutidas foram polidas numa máquina politriz utilizando-se alumina para polimento metalográfico com elevado grau de pureza (99,99%), com partículas de tamanhos $1\mu\text{m}$, $0,3\mu\text{m}$ e $0,05\mu\text{m}$. Em seguida, executou-se o ataque químico nas amostras com Nital na concentração 1% (1ml de ácido nítrico e 99 ml de álcool etílico), durante 30 segundos. Somente depois as peças foram encaminhadas para a medição das variáveis de saída.

A disposição do corpo de prova na resina para o MEV seguia o esquema conforme figura 3.36 :

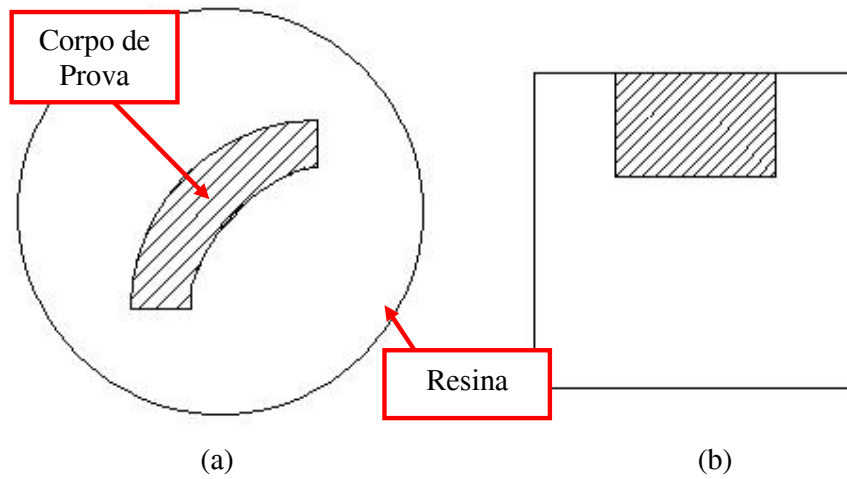


Figura 3.36 – Vista superior (a) e lateral (b) do embutimento destinado a análise de MEV.

Na figura 3.37 é apresentado o embutimento feito no Laboratório de Materiais da UNESP – Bauru.



Figura 3.37 – Embutimento destinado à análise de MEV e microdureza.

3.3.5.5 Microdureza

Os resultados de microdureza foram realizados no Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) empregando-se um microdurômetro BUEHLER, modelo 1600-6300, com uma carga de 200gf, tomando-se as medidas em HK (Knoop).

3.3.5.6 Realização da MEV

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada no Centro de Pesquisa em Óptica e Fotônica, do Instituto de Física de São Carlos (IFSC), da Universidade de São Paulo – USP, *campus* de São Carlos. Foram realizadas ampliações de 1.000 e 5.000 vezes em cada amostra.

O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi um microscópio da marca ZEISS, modelo DSM 960, utilizando-se a técnica dos elétrons espalhados, que permite a visualização com maior facilidade do relevo das estruturas na superfície analisada. A figura 3.38 apresenta o microscópio utilizado nos ensaios.

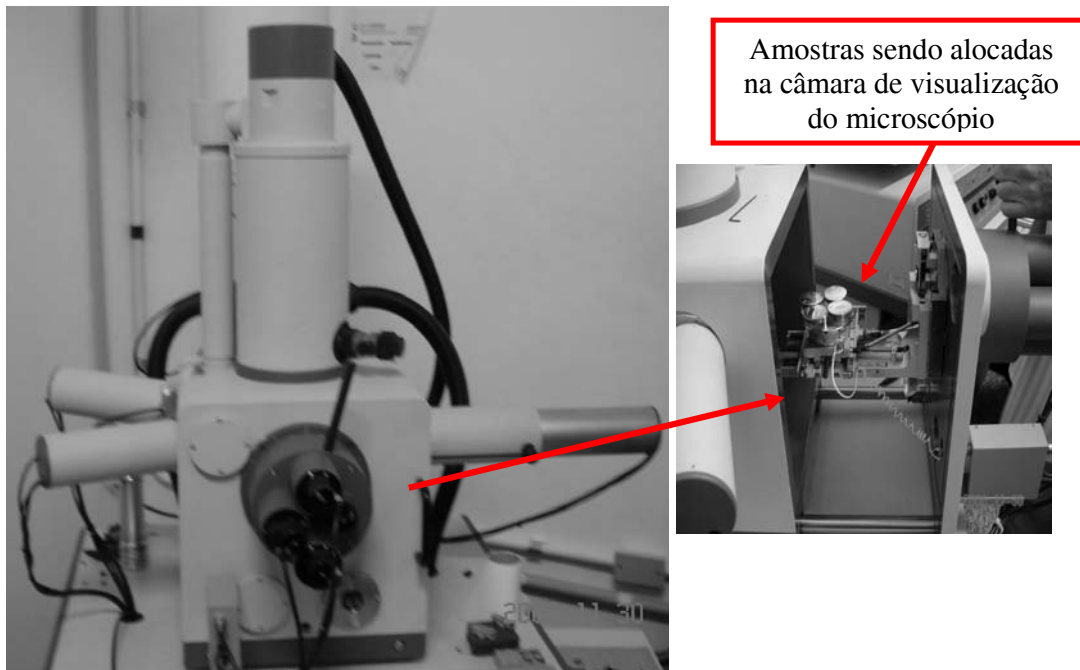


Figura 3.38 – Microscópio eletrônico de varredura DSM 960 do Instituto de Física de São Carlos, USP – São Carlos.

A análise da microscopia eletrônica de varredura foi efetuada em 14 peças (do total de 30 ensaios realizados), sendo duas análises para cada uma das seis condições ensaiadas, mais duas análises referentes a peças não sujeitas da operação de retificação. Os resultados estão dispostos no capítulo 4.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes às variáveis de saída analisadas neste trabalho. Tal análise será feita por meio de gráficos de barras acompanhados de seus respectivos desvios-padrões, os quais foram plotados com os valores médios reais das cinco repetibilidades executadas.

4.1 Rugosidade

Os valores de rugosidade de uma peça são influenciados por diversos fatores, entre eles o tamanho do grão abrasivo, as condições de dressagem do rebolo, a taxa de remoção do material, o tempo de spark-out e pelas condições de lubri-refrigeração.

4.1.1 Valores de rugosidade da primeira etapa

A seguir serão apresentados os valores de rugosidade expressos em micrometros (μm) em função das condições de lubri-refrigeração e taxas de avanço empregadas.

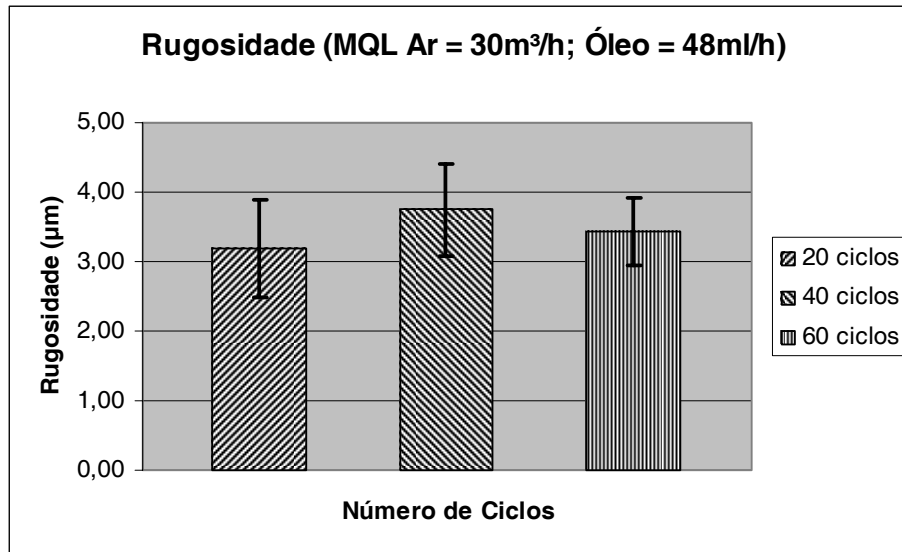


Figura 4.1– Valores de rugosidade obtidos a cada 20 ciclos de retificação com o emprego da técnica de MQL (vazão de ar = 30m³/h; vazão de óleo = 48ml/h).

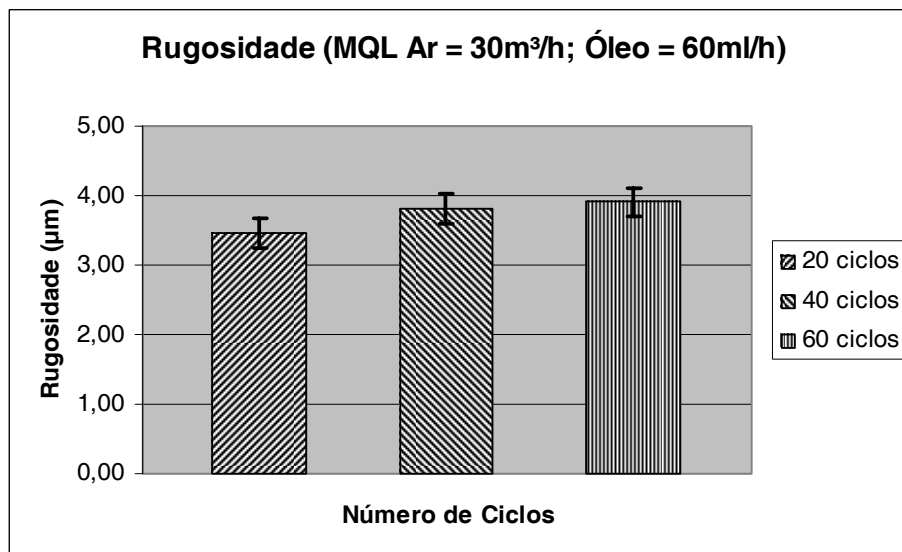


Figura 4.2– Valores de rugosidade obtidos a cada 20 ciclos de retificação com o emprego da técnica de MQL (vazão de ar = 30m³/h; vazão de óleo = 60ml/h).

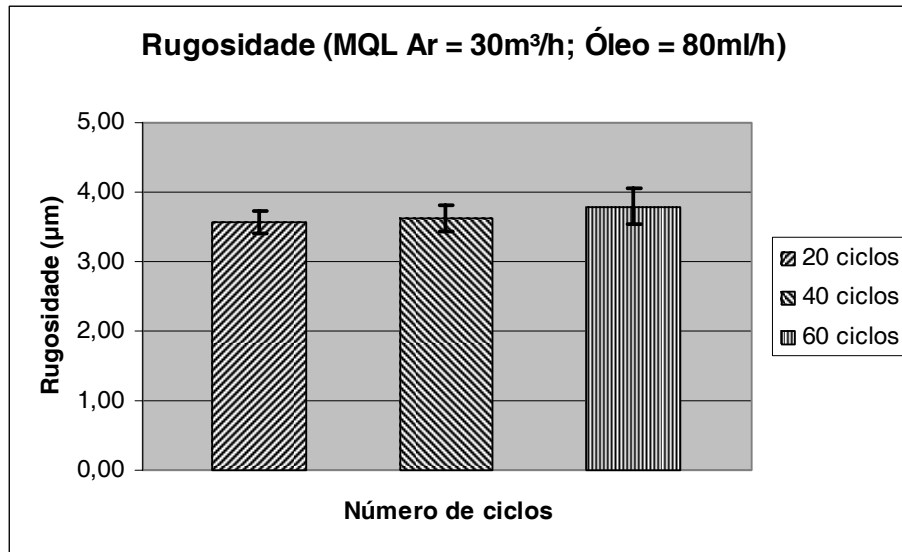


Figura 4.3– Valores de rugosidade obtidos a cada 20 ciclos de retificação com o emprego da técnica de MQL (vazão de ar = 30m³/h; vazão de óleo = 80ml/h).

Observando-se as figuras 4.1, 4.2 e 4.3, constata-se que as vazões de lubrificante utilizadas na técnica de MQL não são capazes de interferir sobre os valores de rugosidade cujos valores se mantiveram em aproximadamente 3,5µm. O aumento dos ciclos de retificação não interferiu sobre os valores de rugosidade, estando todos eles localizado dentro de uma mesma faixa de valores, conclui-se que 20 ciclos são suficientes para se poder avaliar o comportamento do processo.

Constatou-se que a utilização da MQL implicou em um intenso fluxo de ar comprimido incapaz de remover os cavacos da zona de corte. Além disso, a pequena quantidade de óleo pulverizada misturou-se aos cavacos gerados, formando uma “lama”, a qual localizada entre o rebolo e a peça, foi responsável por ocasionar riscos na peça, aumentando em grande escala os valores de rugosidade superficial obtidos com esta técnica. Verifica-se que tais valores estão fora dos limites aceitáveis para o processo de retificação que, de acordo com Diniz et al. (2000), devem estar entre 0,2 e 1,6µm.

4.1.2 Valores de rugosidade da segunda etapa

Na figura 4.4 são apresentados os valores de rugosidade expressos em micrometros (μm) em função das condições de lubri-refrigeração e das taxas de avanço empregadas.

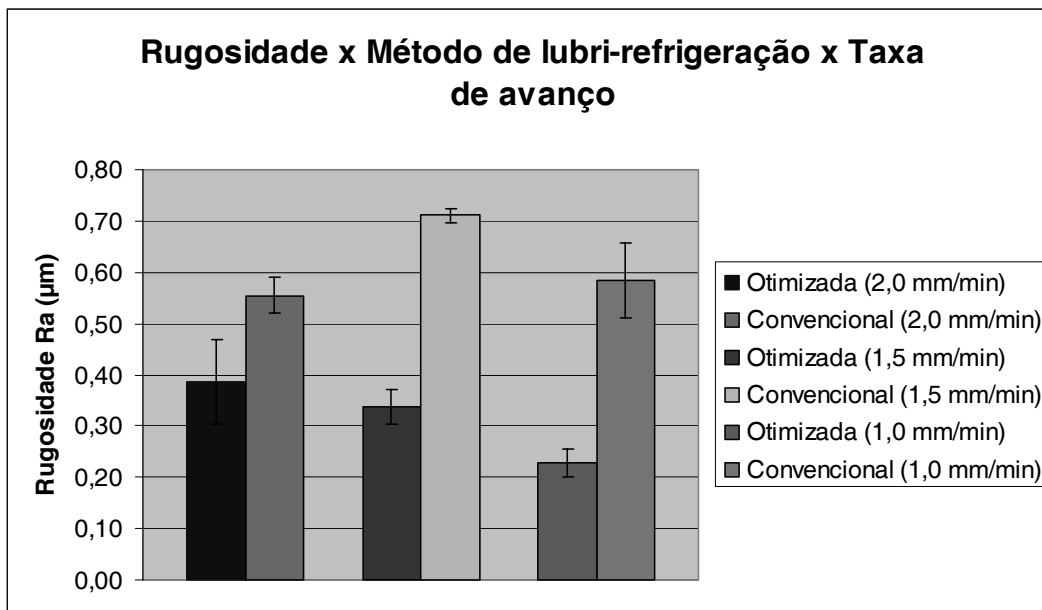


Figura 4.4 – Valores de rugosidade em função do método de lubri-refrigeração e da taxa de avanço empregados.

Analisando a figura 4.4, constata-se que o método otimizado de lubri-refrigeração foi responsável por proporcionar valores de rugosidade menores dos que os obtidos com o método convencional, para todas as taxas de avanço empregadas. Isto deve-se a boa eficácia do jato otimizado na lubrificação, refrigeração e remoção de cavacos da região corte, evitando danos térmicos e riscamentos na peça retificada. Apesar de não apresentar resultados tão bons quanto os obtidos para o método otimizado, o emprego da lubri-refrigeração convencional garantiu valores de rugosidade bastante satisfatórios, entre 0,5 e 0,75 μm , totalmente aceitáveis para a operação de retificação.

4.2 Desvios de Circularidade

A medição dos desvios de circularidade dos corpos de prova retificados possibilita obter maiores informações acerca do erro de forma resultante na peça usinada para cada condição de lubri-refrigeração avaliada neste trabalho. Abaixo serão apresentados os valores dos desvios de circularidade expressos em micrometros (μm).

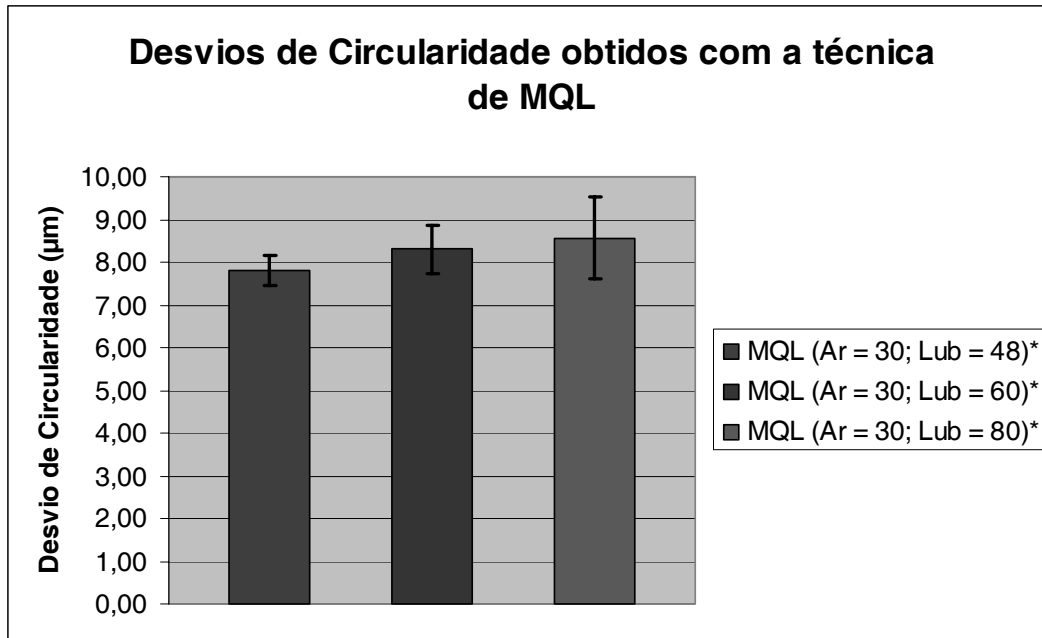


Figura 4.5 – Desvios de circularidade obtidos com a técnica de MQL.

(* A vazão do ar é expressa em m^3/hora e a do lubrificante em ml/hora)

Os desvios de circularidade apresentados na figura 4.5 mostram que tais valores não foram diretamente influenciados pelas vazões de óleo empregadas na técnica de MQL. Observa-se ainda uma pequena tendência de aumento dos valores dos desvios de circularidade proporcionalmente ao aumento da vazão de óleo empregado, no entanto tal fato não se comprova devido à inexistência de diferença estatística entre tais valores.

Verifica-se que valores tão elevados estão associados, ao contrário do que erroneamente inicialmente se supunha, ao modo de fixação. Prender a peça diretamente na castanha, proporcionou intensos esforços radiais sobre a mesma, impondo a mesma, já neste instante, grande parte dos desvios posteriormente mensurados. Isso pôde ser constatado devido a presença três grande lóbulos, correspondentes as três castanhas, na superfície da maior parte das peças.

Na figura 4.6 são apresentados os valores dos desvios de circularidade expressos em micrometros (μm) em função dos métodos de lubri-refrigeração e das taxas de avanço empregadas.

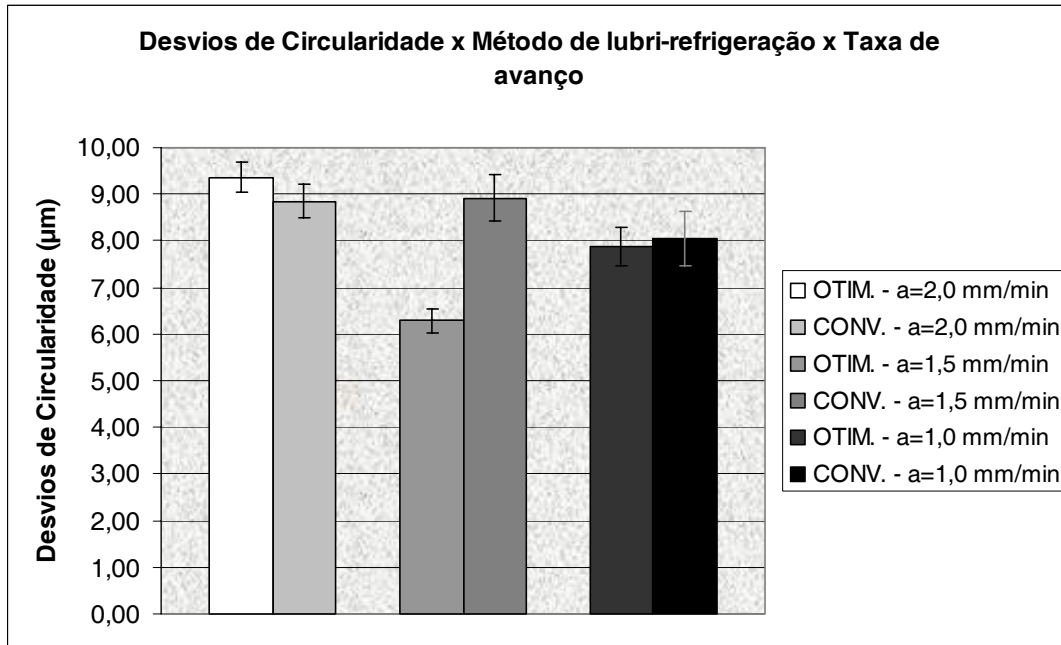


Figura 4.6– Desvios de circularidade em função do método de lubri-refrigeração e da taxa de avanço empregados.

A análise da figura 4.6 permite verificar que os valores dos desvios de circularidade foram bastante elevados para todas as combinações de método de lubri-refrigeração-taxa de avanço empregadas neste trabalho. Com as taxas de avanço de 2,0 mm/min e 1,0 mm/min não houve diferença estatística para os valores dos desvios de circularidade em função da condição de lubri-refrigeração empregada. Já para a taxa de avanço de 1,5 mm/min o método otimizado teve comportamento bastante superior ao obtido com o método convencional, garantindo resultados por de 6,0 μm contra aproximadamente 9,0 μm do segundo método.

Acredita-se que os elevados valores dos desvios de circularidade, embora dentro dos limites aceitáveis estabelecidos por Agostinho et al. (1977), entre 5 e 10 μm , possam estar associados ao pequeno avanço, de 2 μm por ciclo, definido em função do torque suportado pelo cabeçote retificador. Estes ciclos reduzidos podem ter sido

incapazes de neutralizar os desvios de circularidade advindos das operações sofridas anteriormente pelo corpo de prova.

4.3 Microdureza

Para a análise dos resultados de microdureza optou-se pela combinação de gráficos de barra e de linha. Assim, os gráficos de barra obtidos com os valores médios reais das repetibilidades executadas, acompanhados de seus respectivos desvios-padrões, permitiram comparar a eficácia dos métodos lubri-refrigerantes para cada taxa de avanço empregada. Já os gráficos de linha permitiram averiguar o comportamento dos valores de microdureza em função da profundidade e localização da medição no corpo de prova. Nas figuras 4.7, 4.9 e 4.11 são apresentados os valores médios de microdureza em função do método de lubri-refrigeração empregado, utilizando-se, respectivamente, taxa de avanço de 2,0 mm/min; 1,5 mm/min e 1,0 mm/min. Optou-se ainda por apresentar em tais gráficos, os valores médios de microdureza obtidos em regiões adjacentes à interface retificada do corpo de prova.

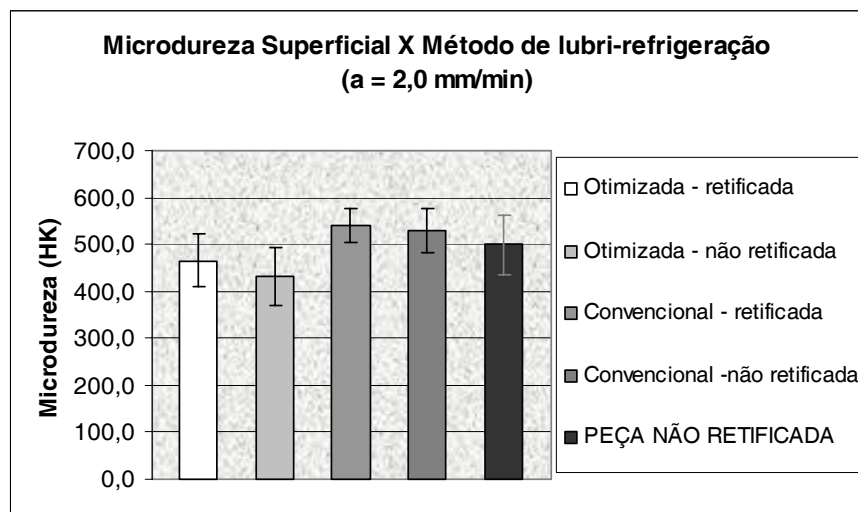


Figura 4.7 – Valores médios de microdureza HK em função do método lubri-refrigerante empregado, utilizando-se taxa de avanço de 2,0 mm/min.

Nas figuras 4.8, 4.10 e 4.12 são apresentados os valores de microdureza em função das profundidades de medição. Estes valores de microdureza estão expressos em

função dos métodos de lubri-refrigeração empregados e das taxas de avanço utilizadas, sendo estas, respectivamente, 2,0 mm/min; 1,5 mm/min e 1,0 mm/min.

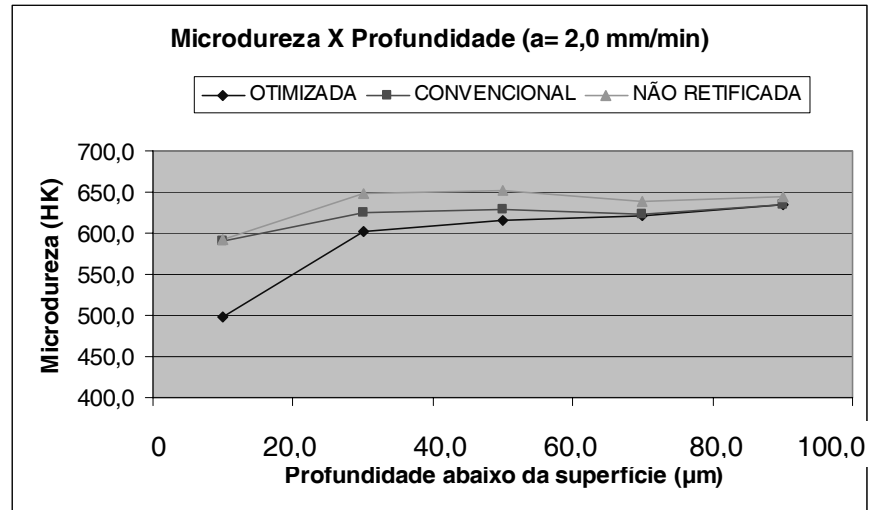


Figura 4.8 – Valores de microdureza HK em função da profundidade de medição, utilizando-se taxa de avanço de 2,0 mm/min.

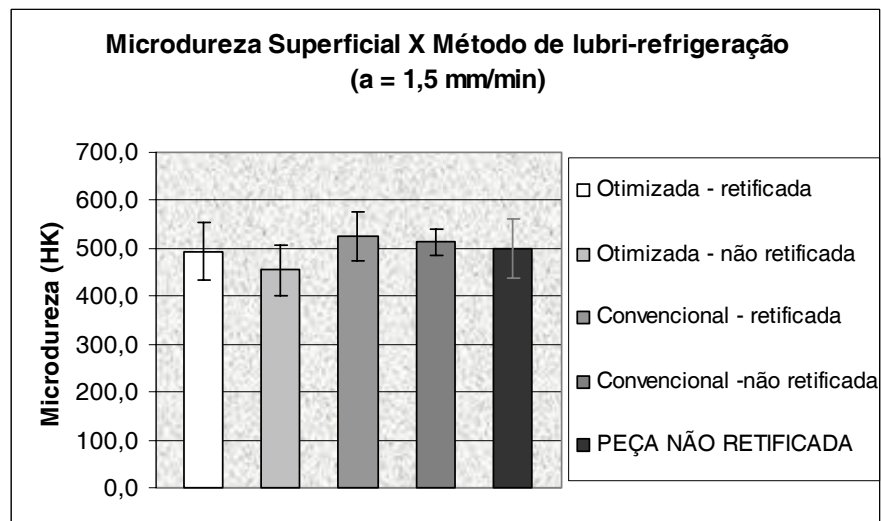


Figura 4.9 – Valores médios de microdureza HK em função do método lubri-refrigerante empregado, utilizando-se taxa de avanço de 1,5 mm/min.

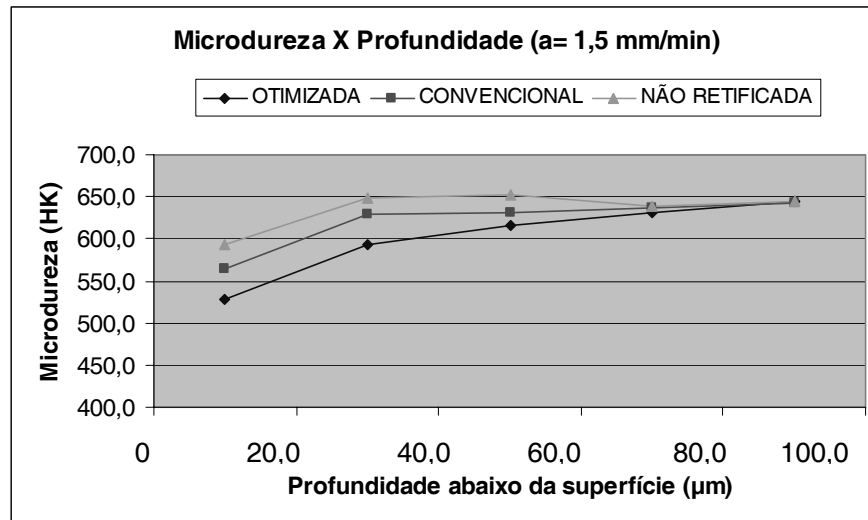


Figura 4.10– Valores de microdureza HK em função da profundidade de medição, utilizando-se taxa de avanço de 1,5 mm/min.

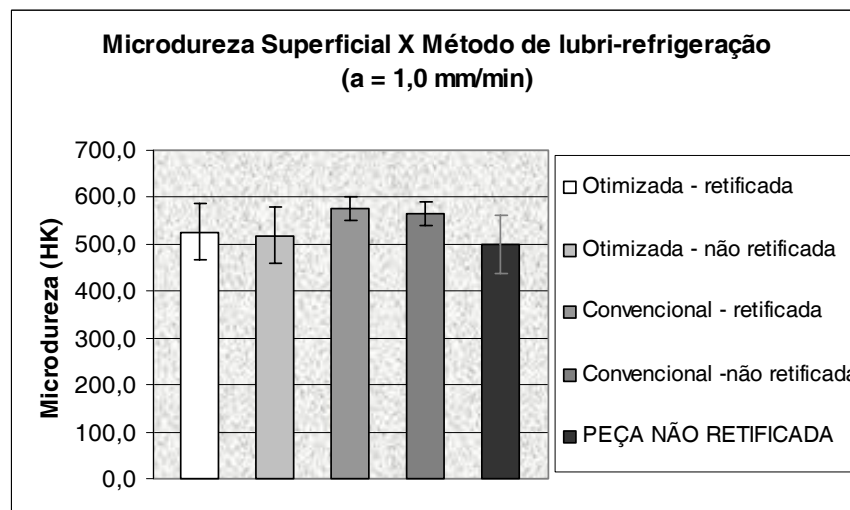


Figura 4.11 – Valores de microdureza HK em função da profundidade de medição, utilizando-se taxa de avanço de 1,0 mm/min.

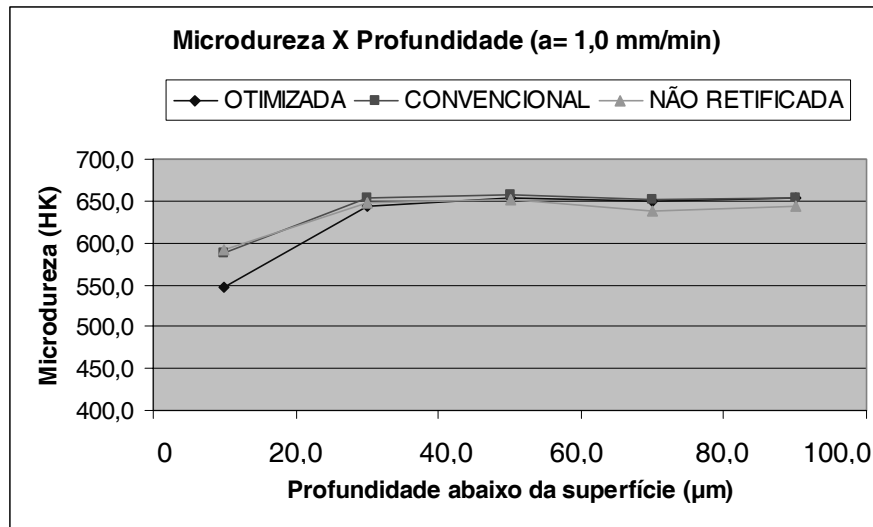


Figura 4.12 – Valores de microdureza HK em função da profundidade de medição, utilizando-se taxa de avanço de 1,0 mm/min.

Sabe-se que os valores de microdureza estão associados principalmente à capacidade de dissipação de calor e velocidade de resfriamento dos corpos de prova, pois a temperatura e modo de resfriamento são fatores determinantes na definição da estrutura granular obtida. De acordo com Silva (2000), a operação de retificação em aços temperados e revenidos pode ocasionar um aumento significativo na microdureza superficial da peça. Isto ocorre devido à queima superficial, que é capaz de provocar um aumento da dureza superficial em função da retêmpera do material, a qual é consequência da reaustenitização do mesmo, proporcionando assim a formação da martensita não-revenida que se caracteriza por elevada dureza e fragilidade. Desta forma, verifica-se que os dois métodos lubri-refrigerantes empregados neste trabalho apresentaram desempenho bastante satisfatório, impedindo a ocorrência de queimas superficiais e aumentos substanciais dos valores de microdureza conforme apresentado nas figuras 4.7, 4.9 e 4.11. Todavia, a análise destas figuras permite observar que embora tenha apresentado desvios-padrões bastante acentuados, o método otimizado de lubri-refrigeração foi responsável por ocasionar os menores valores médios de microdureza para todas as taxas de avanço envolvidas neste trabalho quando comparado ao método convencional. Outra análise cabível refere-se ao pequeno acréscimo de microdureza observado entre a superfície da peça e a profundidade de aproximadamente 30 µm, para todas as condições de lubri-refrigeração, valendo também para as peças não

retificadas. Tal fato demonstra que o tratamento térmico de têmpera e revenimento pode ter provocado pequena perda de carbono superficialmente, padrão para todas as situações, isentando tais tratamentos de ocasionar interferências na análise do processo.

No que diz respeito às taxas de avanço, ao contrário do que se supunha inicialmente, a taxa de 1,0 mm/min foi a que proporcionou maiores valores de microdureza para ambos os métodos lubri-refrigerantes empregados. Acredita-se que isto esteja associado ao desempenho do rebolo de CBN, desenvolvido para condições mais severas de trabalho, apresentando, deste modo, melhores resultados com taxas de avanço mais elevadas.

Apresentou-se ainda nas figuras 4.7, 4.9 e 4.11, os valores de microdureza obtidos fora da faixa retificada, objetivando um melhor entendimento acerca do processo de dissipação de calor através do corpo de prova. Para efeito de comparação optou-se também por efetuar medidas de microdureza em dois corpos de prova não submetidos à operação de retificação, sujeitos apenas aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento executados pela Brasimet. Estes corpos foram definidos como padrão e apresentaram dureza média de aproximadamente 500 HK.

Nas figuras 4.8, 4.10 e 4.12 estão expressos os valores de microdureza em função da profundidade de medição. Observa-se que os menores valores de microdureza, principalmente em regiões próximas a superfície, foram obtidos utilizando-se o método otimizado de lubri-refrigeração. Isto pode ser explicado pelo fato de que em aços temperados retificados sem queima superficial existe geralmente um amolecimento do material próximo à superfície, por terem sido atingidas temperaturas inferiores às de austenitização. A seguir serão apresentados os resultados obtidos por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) que permitirão melhor visualização das microestruturas obtidas após a execução da operação de retificação.

4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A integridade superficial de uma peça é um fator de extrema importância, no entanto danos causados à superfície de um material podem afetá-la significativamente, causando degradação de propriedades relativas à resistência ao desgaste, à corrosão, nucleação e propagação de trincas e aceleração do processo de fadiga da peça. A

integridade superficial de uma peça é afetada principalmente pela temperatura oriunda do processo de retificação, podendo causar danos térmicos na peça.

As figuras 4.13 a 4.17 apresentam os resultados obtidos para a microscopia eletrônica de varredura (MEV) empregando os métodos otimizado e convencional de lubri-refrigeração para três taxas de avanço. Utilizou-se ampliações de 1.000 e de 5.000 vezes, objetivando-se alcançar condições que possibilitassem melhor visualização da microestrutura do corpo de prova.

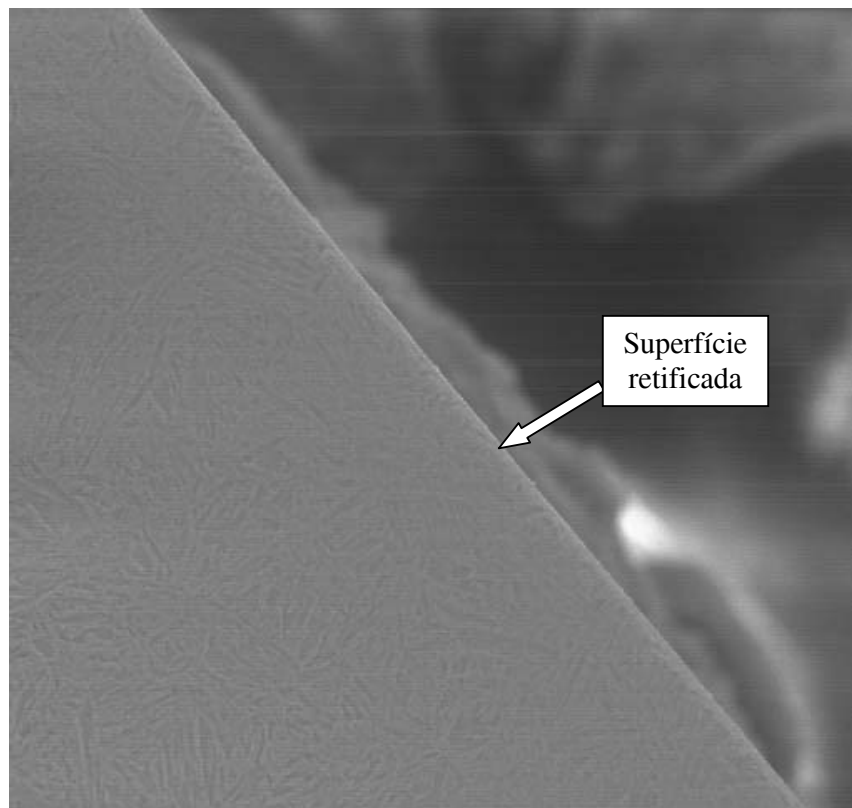


Figura 4.13 – MEV do corpo de prova submetido ao método otimizado de lubri-refrigeração e taxa de avanço de 2,0 mm/min (ampliação de 1000 vezes).

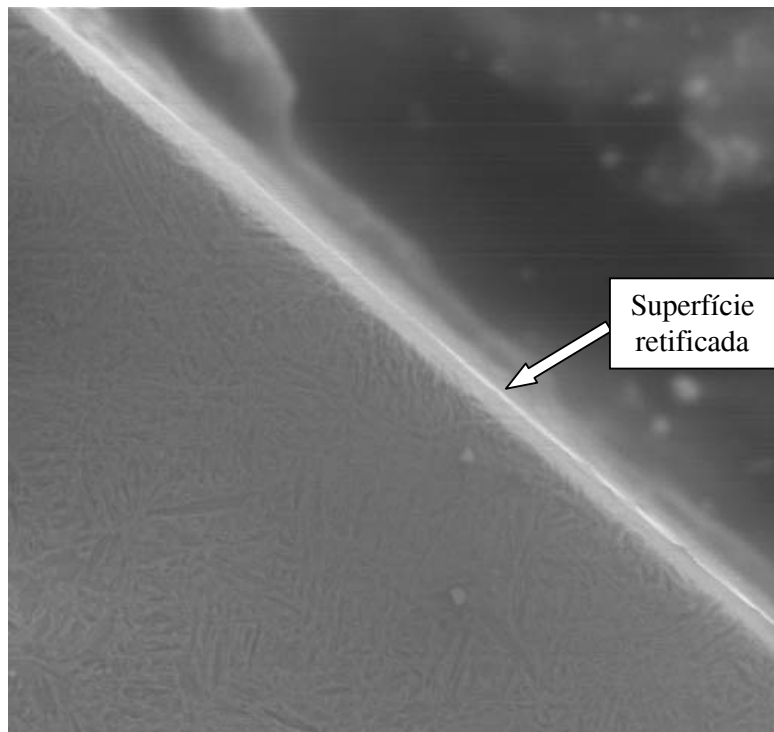


Figura 4.14 – MEV do corpo de prova submetido ao método convencional de lubri-refrigeração e taxa de avanço de 2,0 mm/min (ampliação de 1000 vezes).

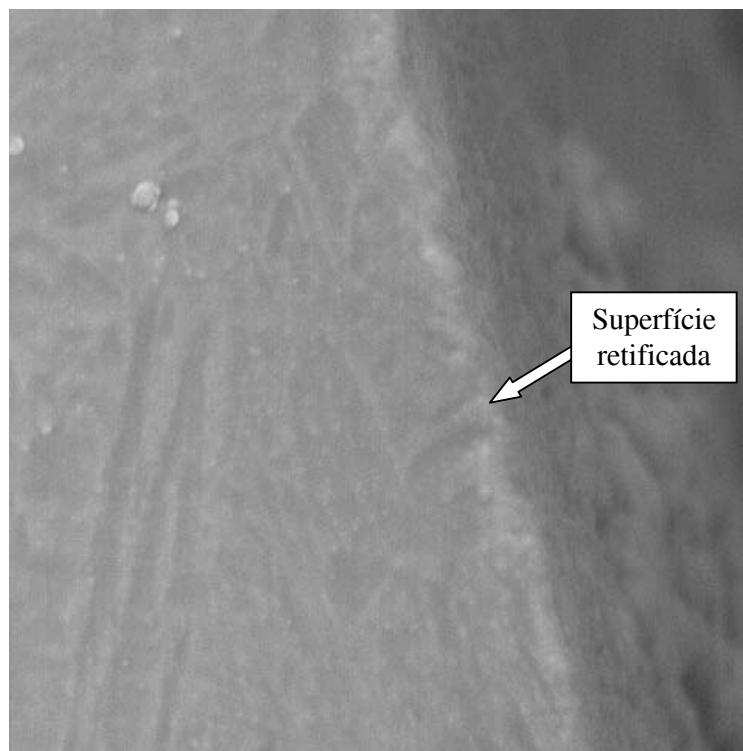


Figura 4.15 – MEV do corpo de prova submetido ao método otimizado de lubri-refrigeração e taxa de avanço de 2,0 mm/min (ampliação de 5000 vezes).

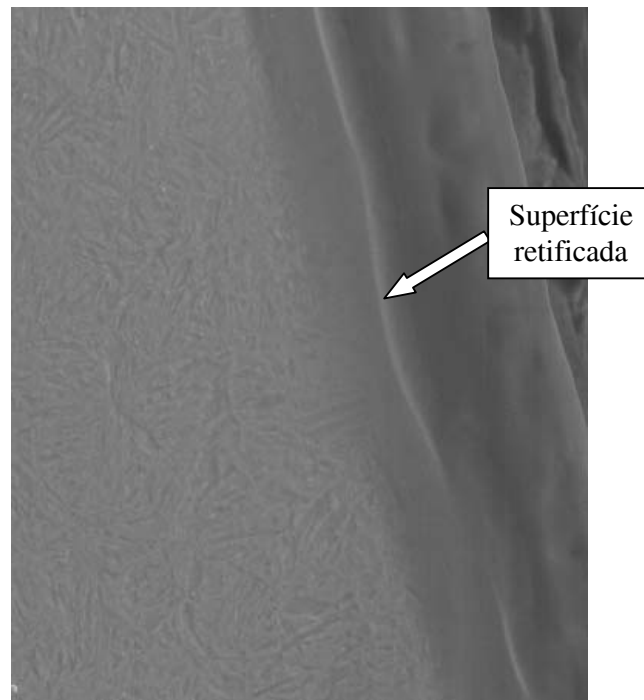


Figura 4.16 – MEV do corpo de prova submetido ao método convencional de lubri-refrigeração e taxa de avanço de 1,5 mm/min (ampliação de 1000 vezes).

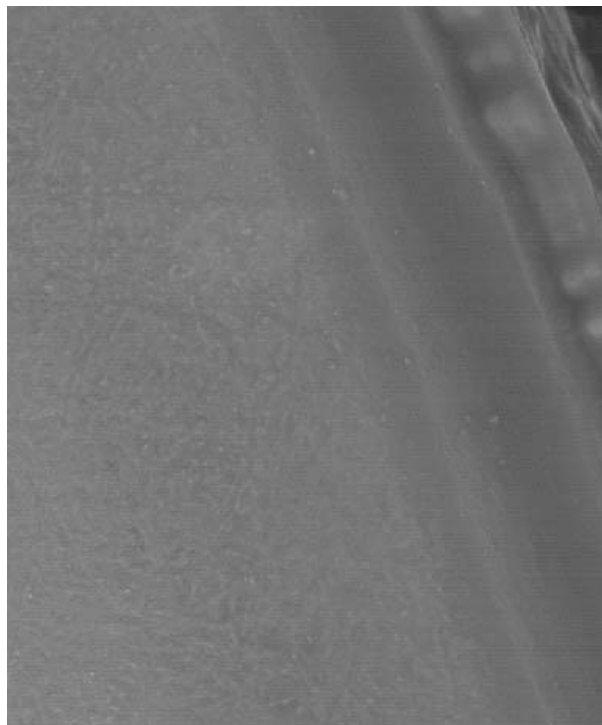


Figura 4.17 – MEV do corpo de prova tratado termicamente e não submetido à operação de retificação (ampliação de 1000 vezes).

Analisando-se as microestruturas, verifica-se que o material do corpo de prova, apresenta uma estrutura martensítica. A formação deste tipo de microestrutura esta associada a temperatura, velocidade de aquecimento e resfriamento (gradientes térmicos), influenciadas pelo tipo e forma de aplicação do fluido de corte. Embora não tenham sido apresentadas todas as microestruturas, pode-se afirmar que não ocorreram diferenças significativas em função da variação da taxa de avanço e do tipo de lubri-refrigeração empregada (otimizada e convencional). Isto se deve provavelmente ao fato de que a quantidade de calor gerada no processo, absorvida pela peça durante o processo de retificação, não foi suficiente para produzir alterações subsuperficiais. Análises de microsonda poderiam auxiliar na obtenção de um melhor detalhamento da estrutura obtida pós-ensaio. No entanto, tal análise foge do escopo inicial deste trabalho. Estuda-se neste momento a execução desta análise, visando garantir outros resultados que possam aprimorar esta pesquisa para publicação em conceituados periódicos.

Tal análise pode ser reforçada visualizando-se a figura 4.17, a qual revela a microestrutura para o corpo de prova após a operação de torneamento, seguido de tratamento térmico (têmpera e revenimento) não submetido à operação de retificação. Através da análise da microestrutura pode-se afirmar que as diversas condições testadas para as técnicas otimizada e convencional de lubri-refrigeração, demonstraram resultados satisfatórios, ou seja, sem alterações significativas da microestrutura após a retificação, não apresentando possíveis danos à superfície da peça, melhorando assim propriedades da peça, como resistência à corrosão e a abrasão e maiores resistência à fadiga.

As imagens obtidas com ampliação de 5000 vezes não apresentaram nitidez suficiente para permitir uma análise detalhada da microestrutura formada.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos experimentos realizados com os dois métodos de lubri-refrigeração (convencional e MQL), pode-se concluir para a retificação cilíndrica interna de mergulho do aço SAE 52100 temperado e revenido que:

- Os valores obtidos para a rugosidade (R_a) não foram influenciados pelo aumento do número de ciclos de retificação;
- Os melhores valores de rugosidade R_a foram obtidos com o método convencional de lubri-refrigeração;
- A aplicação da técnica de MQL na formação de uma pasta (mistura de óleo e cavacos) que ficou retida na região de corte, provocando riscos na superfície interna da peça e o conseqüente aumento dos valores de rugosidade;
- Os métodos de lubri-refrigeração empregados não foram relevantes para determinação dos valores dos desvios de circularidade;
- Os elevados valores do desvio de circularidade provavelmente resultaram do fato da peça ter sido fixada pelas castanhas da placa da máquina retificadora;
- O desgaste diametral do rebolo foi muito pouco expressivo, impossibilitando sua medição. Este fato indica uma longa durabilidade do rebolo de CBN utilizado;
- O trabalho desenvolvido foi capaz de proporcionar novas informações acerca da aplicação da técnica de MQL na operação de retificação. No entanto há a necessidade de novos estudos abordando esta técnica, envolvendo outros parâmetros que viabilizem sua aplicação.

Analisando os dados obtidos nos ensaios realizados com o aço ABNT 4340 temperado e revenido, quando submetido à operação de retificação cilíndrica interna de mergulho com a aplicação do método convencional e otimizado de lubri-refrigeração, empregando-se três diferentes taxas de avanço, pode concluir-se que:

- A análise geral dos resultados indica que o método otimizado de lubri-refrigeração mostrou-se mais eficiente que o método convencional;
- O modelo otimizado de lubri-refrigeração apresentou valores de rugosidade significativamente menores para todas as taxas de avanço empregadas, principalmente para a de 1,0 mm/min, comprovando assim a eficácia do jato com relação à lubrificação;
- Com relação aos desvios de circularidade observa-se que não ocorrem diferenças significativas entre as técnicas empregadas, exceto com a taxa de avanço de 1,5 mm/min, em que os resultados obtidos com a lubri-refrigeração otimizada são melhores;
- No que diz respeito à microdureza e a MEV, verificou-se que não ocorreram alterações das propriedades do material, devido à eficácia de ambos os modelos lubri-refrigerantes empregados.

Por fim, enfatiza-se a grande contribuição desta pesquisa para o meio científico e industrial, pois a mesma demonstrou que o método otimizado de lubri-refrigeração utilizado neste trabalho é capaz de proporcionar resultados finais às peças semelhantes ou até mesmo superiores aos que foram obtidos com o método lubri-refrigerante convencional. Assegurando desta forma, a possibilidade de melhoria de desempenho em atividades industriais que empreguem a operação de retificação cilíndrica interna. Além disso, o método otimizado tende a promover uma maior economia quanto ao consumo e ao descarte dos fluidos de corte e reduzindo os possíveis problemas ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores que os fluidos em excesso podem causar.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados e conclusões deste trabalho, para o aprimoramento do processo de retificação cilíndrica interna, as sugestões são as seguintes:

Aplicação da técnica de MQL de tal forma que possibilite a expulsão do óleo e cavaco (lama) da região de corte durante a operação de retificação, pois houve o riscamento da superfície usinada pelo acúmulo deste material prejudicando a rugosidade.

Verificação da micro dureza e micro estrutura (MEV) com a operação de retificação cilíndrica interna utilizando-se o método MQL de lubri-refrigeração.

Utilização de um cabeçote retificador de maior potência, visto que o torque pequeno foi limitante na escolha do avanço e do tempo de centelhamento.

Varição da rotação do cabeçote e do diâmetro do rebolo , ajustando a velocidade periférica do rebolo com a do fluido de corte e aumentando o torque da ferramenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, Y.M.; ZHANG, L.C. **Surface roughness prediction of ground components using a fuzzy logic approach.** Journal of Materials Processing Technology 89–90, p. 561–568, 1999.

BALDO, E. D. **Redução do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com auxílio da emissão acústica.** Dissertação de Mestrado - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, p. 86, 1994.

BERTALAN, C. **Retificação com Rebolos de Nitreto de Boro Cúbico em Máquinas-Ferramentas Convencionais.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

BOTTA, W.J.F., MOREIRA, A. Jr. **“Uso da Microscopia Analítica em Análise Microestrutural”** Universidade Federal de São Carlos - UFSCar - Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais - CCDM – Curso ministrado em 20 e 21 de setembro de 2001.

BIANCHI, E. C.; OLIVEIRA, J. F. **Controle da geometria do cavaco gerado por rebolos CBN.** Revista Máquinas & Metais, julho 1993, p. 26-31.

BIANCHI, E. C.; DIAS, A. C. P.; BORTOLOTO, R. G.; JÚNIOR, C. E. S.; SANCHEZ, L. E. A.; JÚNIOR, M. V. **A otimização da agressividade de rebolos pelas condições de usinagem e dressagem.** Revista Máquinas e Metais, maio, p.70-83, 1996.

BIANCHI, C. E.; VALARELLI, I. D.; AGUIAR, P. R.; SILVA, E. J.; MONICI, R. D.; SOUZA, G. F. **A contribuição dos rebolos de CBN para a melhoria da competitividade e qualidade.** Revista Máquinas e Metais, abril, p. 170-197, 2001.

BURMEISTER, N. M. **Óleos lubrificantes usados**. Site Institucional da Indústria Petroquímica do Sul, Disponível em: <<http://www.petroquimicasul.com.br>>. Acesso em: 15 jun. 2005.

CATAI, R. E. **Otimização das Condições de Refrigeração/Lubrificação no Processo de Retificação Cilíndrica de Mergulho**. Tese de Doutorado, UNESP, Guaratinguetá, SP, Brasil, 2004.

CATAI, R. E. Saúde, segurança e política ambiental envolvidas na utilização dos fluidos de corte nos processos de usinagem dentro das indústrias. Monografia apresentada para obtenção do título de Engenheiro de Segurança de Trabalho, UNESP, Bauru, São Paulo, Brasil, 2003.

CHANG C. C.; SZERI A. Z. **A thermal analysis of grinding**. WEAR, nº 216, p. 77-85, 1998.

CHEN, X., ROWE, W. B., McCORMACK, D. F. **Analysis of the transitional temperature for tensile residual stress in grinding**. Journal of Materials Processing Technology, nº 107, 2000, p. 216-221.

CHEN, M. C. **Roundness measurements for discontinuous perimeters via machine visions**. Computers in Industry, Vol. 47, p. 185-197, 2002.

CHEN X., ROWE W. B., CAI R. **Precision grinding using CBN wheels**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, p. 585-593, 2002.

CHO, N.; TU, J. **Roundness modeling of machined parts for tolerance analysis**. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 25, p. 35-47, 2001.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 2ª Edição, 2000, p.225-244.

DORNFELD, D. A. **Monitoração de processos por emissão acústica.** Revista Máquinas & Metais, p.64-81, maio 1999.

EBBRELL, S.; WOOLLEY, N. H.; TRIDIMAS, Y. D.; ALLANSON, D. R.; ROWE, W. B. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. International Journal of Machine Tools & Manufacture, School of Engineering, Liverpool, Reino Unido, Vol. 40, p. 209-223, junho 1999.

EL BARADIE, M. A. **Cutting fluids: Part I. Characterisation.** Journal of Materials Processing Technology, Irlanda, Vol. 56, p. 786-797, 1996.

FELIPE JÚNIOR, J. **Estudo fenomenológico do processo de retificação creep-feed.** Dissertação de mestrado, USP/EESC/SEM, 1992.

FUSSE, R. Y. **Estudo comparativo entre a lubri-refrigeração convencional e a mql no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, UNESP, Bauru, SP, Brasil, março 2005.

GRAF, W. **Cylindrical Grinding.** Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 2004.

HAFENBRAEDL, D.; MALKIN, S. **Tecnologia ambientalmente correta para retificação cilíndrica interna.** Revista Máquinas & Metais, Vol. 37, nº 426, p. 40-55, julho 2001.

HASSUI, A.; DINIZ, A. E.; OLIVEIRA, J. F. G.; FELIPE, J.; GOMES J. J. F. **Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission.** Wear, Vol. 217, p. 7-14, 1998.

HASSUI, A. **Estudo da vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho.** Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2002.

HASSUI, A.; DINIZ A. E. **Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, p. 855–862, 2003.

HECKER, R. L.; LIANG S. Y. **Predictive modeling of surface roughness in grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, p. 755–761, 2003.

HEISEL, U.; LUTZ, M.; SPATH, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. **A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXIV, nº 385, p. 22-38, fevereiro 1998.

HITCHINER, M. **O emprego da alta velocidade com rebolos de CBN.** Revista Máquinas e Metais, Setembro, Ano XXXVII, nº 428, p. 116-133, 2001.

HRYNIEWICZ, P.; SZERI, A. Z.; JAHANMIR, S. **Coolant Flow in Surface Grinding with Non-Porous Wheels.** International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 42, p. 2347-2367, 2000.

JACKSON, M. J.; MILLS, B. **Materials selection applied to vitrified alumina & CBN grinding whells.** Journal of Materials Processing Technology nº 108, p. 114-124, 2000.

JACKSON, M. J.; DAVIS C.J.; HITCHINER M.P.; MILLS B. **High-speed grinding with CBN grinding wheels – applications and future technology.** Journal of Materials Processing Technology, Vol. 110, p. 78-88, 2001.

JOHNSON, G. A. **Beneficial Compressive Residual Stress Resulting from CBN Grinding.** SME Second International Grinding Conference, Philadelphia, Pennsylvania, p. 1-12, 1986.

KIM, H. Y.; KIM, S. R.; AHN, J. H.; KIM, S. H. **Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission.** Journal of Materials Processing Technology, nº 111, p. 273-278, 2001.

KLOCKE, F.; BECK, T.; EISENBLÄTTER, G.; LUNG, D. **Minimal Quantity Lubrication (MQL) – Motivation, Fundamentals, Vistas.** In: 12th International Colloquium Industrial and Automotive Lubrication, Technische Akademie Esslingen, 11-13 jan., 14p, 2000.

KOELSCH, J. R. **Se a escolha for certa, os rebolos superabrasivos ajudam a economizar.** Revista Máquinas & Metais, novembro 2003, nº 454, p. 26-43.

KWAK, J. S., Sim, S. B.; Jeong, Y. D. **An analysis of grinding power and surface roughness in external cylindrical grinding of hardened SCM440 steel using the response surface method.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, p. 1-9, 2005.

LEE, E. S.; KIM, N. H. **A study on the machining characteristics in the external plunge grinding using the current signal of the spindle motor.** International Journal of Machining Tools & Manufacture, nº 41, p. 937-951, 2001.

LEZANSKI, P. **An intelligent system for grinding wheel condition monitoring.** Journal of Materials Processing Technology, nº 109, p. 258-263, 2001.

LIAO, Y. S.; LUO, S. Y.; YANG, T. H. **A thermal model of the wet grinding process.** Journal of Materials Processing Technology, nº 101, 2000, p. 137-145.

LIU, J.J.B. **Monitoring the Precision Machining Process: Sensor, Signal, Processing and Information Analysis.** PhD Thesis, Dept. of Mech. Engr., University of California, Berkeley, 171 pp, 1991.

LIU, Q.; CHEN, X.; GINDY, N. **Fuzzy pattern recognition of AE signals for grinding burn.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, article in press, p. 1–8, 2005.

MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. **Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte,** In: Congresso Usinagem 2000, São Paulo – SP, 2000.

MALKIN, S. **Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage.** In: MALKIN, S. Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.

MANNHEIMER, W. A. **Microscopia dos Materiais,** Rio de Janeiro, E-papers Serviços Editorais, 2002.

MONICI, R. D.; BIANCHI, E. C.; CATAI, R. E.; AGUIAR P. R. Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasive CBN grinding wheels. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, p. 122-131, 2005.

MOTTA, M. F.; MACHADO A. R. **Fluidos de corte: tipos, funções, seleção, métodos de aplicação e manutenção.** Revista Máquinas e Metais, setembro, p. 44-56, 1995.

NATHAN, R. D.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R. **In-process monitoring of grinding burn in the cylindrical grinding of steel.** Journal of Materials Processing Technology, Vol. 91, p. 37–42, 1999.

NOVASKI, O., DÖRR, J. **Usinagem sem refrigeração.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXV, nº 398, p. 18-27, março, 1999.

NOVASKI, O., RIOS, M. **Introdução teórica e vantagens de uso na usinagem de aços-liga.** Revista Máquinas e Metais, Ano XL, nº 460, p. 214-223, maio 2004.

NUSSBAUM, O. H. C. **Rebolos e abrasivos** - Tecnologia básica, Ícone editora Ltda, 1988.

OLIVEIRA, J. F. G. de; BIANCHI, E. C.; SOUZA, G. F. **O desempenho de rebolos pode ser controlado pela dressagem.** Revista Máquinas e Metais, Ano XVII, nº 317, junho, p. 12-28, 1992.

RAMOS C. A. D., COSTA E. S., MACHADO Á. R. **Tendências, utilização e aspectos ecológicos.** Revista Máquinas & Metais, Ano XXXIX, julho, p.116-134, 2003.

ROWE W. B.; MILLS Y. L. B.; ALLANSON D. R. **Application of intelligent CNC in grinding.** Computers in Industry, nº 31, p. 45-60, 1996.

ROWE W. B.; CHEN Y.; MORUZZI J. L.; MILLS B. **A generic intelligent control system for grinding.** Computer Integrated Manufacturing Systems. Vol 10, nº 3, p. 231-241, 1997.

RUNGE, P. R. F., DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas indústrias – produção, manutenção e controle.** Cotia, SP, Brasil, Triboconcept Edições Técnicas, 1990, p. 71-171.

SALES, W. F. **Determinação das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte.** Tese de Doutorado, Uberlândia, MG, Abril, 166p, 1999.

SCHMIDT, J.; DYCK, M. **Uma rede de tecnologia para eliminar os fluidos de corte.** Revista Máquinas & Metais, nº 449, junho de 2003

SCHUITEK, A. J.; SEVERIANO, A. C.; BELLOS, N. L. **Um caso bem sucedido de uso de rebolos de CBN.** Revista Máquinas e Metais, p 112-125, 2001.

SHAW, M. C. **Principles of abrasives processing.** Oxford Science on Advanced Manufacturing, New York, USA, 574 p, 1996.

SHELL. **Curso de lubrificação industrial – Fluidos de corte.** Centro de treinamento, Shell do Brasil, Divisão Petróleo, Imp. Metodista, 40 p, 1991.

SILVA, E. J., BIANCHI, E. C., SOUZA, G. F., FORTULAN, C. A., FERNANDES, O. C., VALARELLI, I. D., AGUIAR, P. R. **Avaliação do mecanismo de remoção e da integridade superficial.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVI, nº 407, dezembro, p.70-83, 1999.

SILVA, E. J. **Análise da influência dos tipos de fluido de corte e rebolo na retificação do aço SAE HVN-3.** Dissertação de Mestrado – UNESP, Bauru, SP, Brasil, 2000.

SILVA, L. R., BIANCHI, E. C., FUSSE, R. Y., FRANÇA, T. V., NETO, L. D., CATAI, R. E., AGUIAR, P. R. **Aplicação da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante - MQL no processo de retificação.** In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2004, Belém, Pará, Brasil, 2004.

SOKOVIC, M., MIJANOVIC, K. **Ecological aspects of cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes.** Journal of Materials Processing Technology, Slovenia, nº 109, p. 181-189, 2001.

SREEJITH P. S.; NGOI, B. K. A. **Dry machining: Machining of the future.** Journal of Materials Processing Technology , nº 101, p. 287-291, 2000.

TAWAKOLI, T. **Minimum coolant lubrication in grinding.** Industrial Diamond Review, nº 1, p. 60-65, 2003.

WANG, W.; CHEN, H.; HU, Y.; WANG, H. **Effect of surface roughness parameters on mixed lubrication characteristics.** Tribology International, p. 1–6, 2005

WEBSTER, J. A. **Selection of coolant type and application technique in grinding.** Supergrind, p. 206-220, 1995.

WEBSTER, J. A.; CUI, C.; MINDEK Jr. R. B. **Grinding fluid application system design.** In: Annals of the CIRP, vol. 44, p. 333-338, 1995.

WESTKÄMPER, E.; KLYK, M. **Retificação de diâmetros internos a alta velocidade com rebolos CBN.** Revista Máquinas e Metais, nº 393, outubro, p.38-53, 1998.

WINTER. **Retificação.** Apostila de treinamento técnico da Empresa Winter, Jundiaí, SP, Brasil, 2004.