



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru



**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A LUBRI-REFRIGERAÇÃO CONVENCIONAL
E A MQL NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE
MERGULHO**

RONALDO YOSHINOBU FUSSE

**Dissertação apresentada a Faculdade de
Engenharia da UNESP - Campus de Bauru,
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Industrial.**

**BAURU - SP
MARÇO - 2005**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru



**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A LUBRI-REFRIGERAÇÃO CONVENCIONAL
E A MQL NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE
MERGULHO**

RONALDO YOSHINOBU FUSSE

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Co-Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar

**Dissertação apresentada a Faculdade de
Engenharia da UNESP - Campus de Bauru,
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Industrial.**

**BAURU - SP
MARÇO - 2005**

DEDICATÓRIA

Aos meus Pais Hiroshi Füsse, Toshiko Ide Füsse, aos meus irmãos César Hideki Füsse e Adriana Akemi Füsse e aos meus avós Katsuichi Ide e Yoshiko Ide.

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.

À CAPES pela concessão da Bolsa de Mestrado.

Em especial ao Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva do Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET) de Belo Horizonte – MG, Dr. Rodrigo Eduardo Catai que colaboraram de forma direta sempre com muita sinceridade e companheirismo durante toda a confecção deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Luiz Daré Neto pelo auxílio técnico prestado na realização dessa pesquisa.

Ao Prof. Dr. César Antunes de Freitas, da Faculdade de Odontologia de Bauru (USP), pelas colaborações na forma de sugestões.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP, Campus de Bauru e aos Laboratórios de Pesquisa pertencentes à Instituição. De forma especial a todos os Docentes e Funcionários que de alguma forma vieram a contribuir no desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos Uilson Kruger da Oficina Mecânica e Osmar Luis Martinelli do Laboratório de Engenharia Elétrica pelas valiosas informações e ajudas prestadas.

Aos técnicos Carlos Roberto Firlanetto do Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado, Hamilton José de Mello do Laboratório de Materiais pelo apoio técnico fornecido.

Aos Mestres Eraldo Jannone da Silva, Rodrigo Daun Monici e Sidney Domingues, e aos mestrandos, Thiago Valle França, Thiago Cardoso Magagnin, os quais colaboraram com amizade e informações úteis à pesquisa.

Aos meus amigos Luciano Henrique de Almeida e Juliana Maria Albuquerque Gimenez que sempre me incentivaram durante todo o meu trabalho.

A minha namorada Daniela Quimelo por estar sempre presente ao meu lado e me apoiando intensamente durante a realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Difração de Raios-X, do Centro de Caracterização de Materiais (CCDM) de São Carlos - SP, na pessoa dos Pesquisadores Associados Dr. Rogério Machado e a M.Sc. Fabíola de Moraes, pelo auxílio técnico na determinação das tensões residuais e realização das microscopias eletrônicas de varredura nos componentes usinados.

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

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. JUSTIFICATIVA PARA REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO.....	3
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1. Variáveis no Processo de Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho	5
4.1.1 Mecanismo de formação do cavaco	5
4.1.2 Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})	6
4.1.3. Arco ou Comprimento de Contato (l_c)	7
4.2. Rebolos	7
4.2.1. Dressagem do Rebolo.....	8
4.3. Fluidos de corte	9
4.3.1. Classificação dos fluidos de corte	9
4.3.1.2. Funções do fluido de corte	12
4.3.1.3. Aspectos ambientais quanto à utilização de fluidos de corte	13
4.3.1.4. Otimização da Aplicação de Fluidos de Corte	15
4.3.1.5. A Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)	17
4.3.1.5.1. Classificação e Projeto de Sistemas com Mínima Quantidade de Lubrificante	23
4.3.1.6 Influência da ferramenta e do fluido de corte nas trocas térmicas	25
4.4. Variáveis de saída envolvidas no processo de retificação.....	27
4.4.1. Força tangencial de corte (F_t) e energia específica (u)	27
4.4.2. Desgaste diametral do rebolo	30
4.4.3. Integridade Superficial	31
4.4.3.1. Rugosidade	31
4.4.3.2. Circularidade	32
4.4.3.2.1. Tolerância geométrica de forma.....	32
4.4.3.2.2. Definição de circularidade.....	33

4.4.3.2.3 A influência dos componentes mecânicos nas máquinas-ferramentas na formação dos erros de circularidade.....	33
4.4.3.3. Análise da microestrutura - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	34
4.4.3.4. Danos térmicos na retificação	35
4.4.3.4.1. Microdureza.....	36
4.4.3.4.2.Tensões residuais.....	37
5. MATERIAIS E MÉTODOS	40
5.1. Material dos corpos de prova	40
5.2. Tipos de ferramentas utilizados.....	41
5.3. Lubri-refrigeração convencional	41
5.3.1. Bocal utilizado.....	42
5.4. Mínima Quantidade de Refrigeração - MQL	42
5.4.1. Bocal utilizado.....	44
5.5. Aquisição de Dados.....	46
5.5.1. Força Tangencial de Corte	48
5.5.2. Energia Específica de Retificação.....	51
5.5.3. Medição do desgaste diametral do rebolo	51
5.5.4. Circularidade	52
5.5.5. Rugosidade	54
5.5.6. Preparação das amostras para análise.....	55
5.5.6.1. Microdureza.....	56
5.5.6.2. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	58
5.5.6.3. Tensão Residual	59
5.6. Seqüência de realização de ensaios	61
5.7. Marcação do desgaste do rebolo	62
5.8. Dressagem do rebolo	63
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
6.1. Força Tangencial de Corte	64
6.1.1. Força Tangencial de Corte – Rebolo de Óxido de Alumínio	64
6.1.2. Força Tangencial de Corte – Rebolo de CBN.....	70
6.2. Energia Específica de Retificação.....	72
6.2.1. Energia Específica de Retificação – Rebolo de Óxido de Alumínio	72
6.2.2. Energia Específica de Retificação – Rebolo de CBN	77
6.3. Tensão Residual	79

6.4. Circularidade	81
6.5. Desgaste diametral da ferramenta	82
6.6. Rugosidade	84
6.7. Microdureza.....	85
6.7.1. Microdureza – Rebolo de Óxido de Alumínio	85
6.7.2. Microdureza – Rebolo de CBN	89
6.8. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	91
7. CONCLUSÕES.....	97
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Formação do cavaco por um grão abrasivo, (MALKIN, 1989)	5
Figura 4.2 - Funções do fluido de corte no processo de retificação (Monici, 2003 - adaptado).....	13
Figura 4.3 - Diagrama Esquemático de um Sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação (Heisel et al., 1998).....	24
Figura 4.4 - Ilustração das componentes de força para retificação de mergulho (a) retificação plana, (b) retificação cilíndrica.....	28
Figura 4.5 - Distribuição da tensão residual induzida pela retificação, as quais são consideradas induzidas termicamente (MALKIN, 1989).....	38
Figura 5.1 - Dimensões iniciais do corpo de prova	40
Figura 5.2 - Disposição de montagem do bocal para lubri-refrigeração convencional.....	42
Figura 5.3 - (a) e (b) aplicador ITW Accu-lube 79053D.....	43
Figura 5.4 - Esquema de montagem da linha de ar comprimido	44
Figura 5.5 - Bocal para MQL (a) vista superior do bocal, (b) vista lateral do bocal, (c) vista anterior do bocal	45
Figura 5.6 - Disposição da montagem do bocal para MQL.....	46
Figura 5.7 - Montagem dos equipamentos para aquisição dos dados.....	47
Figura 5.8 - Tela de apresentação do programa.....	48
Figura 5.9 - Curva de calibração da rotação	49
Figura 5.10 - Curva de calibração do módulo de potência (curvopower).....	50
Figura 5.11 - Circularímetro e computador	52
Figura 5.12 - Base acoplada à máquina.....	53
Figura 5.13 - Sequência das medições de circularidade	54
Figura 5.14 - Rugosímetro.....	54
Figura 5.15 - Pontos de medição de circularidade.....	55
Figura 5.16 - Divisão da peça para análise.....	55
Figura 5.17 - Embutimento do corpo de prova para o MEV e tensão residual, (a) vista superior, (b) vista lateral	56
Figura 5.18 - Embutimento do corpo de prova para a microdureza, (a) vista superior, (b) vista lateral.....	56
Figura 5.19 - Vista lateral da amostra (adaptado Silva, 2004).....	57
Figura 5.20 - Microscópio eletrônico de varredura STEREOSCAN 440 com as amostras.....	59
Figura 5.21 - Difrátômetro de quatro círculos, modelo D5000.	60
Figura 5.22 – Fluxograma dos ensaios	62
Figura 5.23 - Marcação do desgaste diametral do rebolo	63
Figura 5.24 - Operação de dressagem	63
Figura 6.1 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h.....	65
Figura 6.2 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h.....	65
Figura 6.3 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h.....	66

Figura 6.4 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h.....	66
Figura 6.5 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h.....	67
Figura 6.6 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h.....	67
Figura 6.7 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, sem refrigeração (a seco)	69
Figura 6.8 - Força tangencial de corte para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h.....	70
Figura 6.9 - Força tangencial de corte para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h.....	71
Figura 6.10 - Força tangencial de corte para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h.....	71
Figura 6.11 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h	73
Figura 6.12 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h	74
Figura 6.13 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h	74
Figura 6.14 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h	75
Figura 6.15 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h	75
Figura 6.16 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h	76
Figura 6.17 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, sem refrigeração (a seco).....	77
Figura 6.18 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h.....	78
Figura 6.19 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h.....	78
Figura 6.20 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h.....	79
Figura 6.21 - Tensão residual	81
Figura 6.22 - Circularidade.....	82
Figura 6.23 - Desgaste diametral do rebolo.....	83
Figura 6.24 - Rugosidade	85
Figura 6.25 - Microdureza para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h	86
Figura 6.26 - Microdureza para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h	87

Figura 6.27 - Microdureza para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h	87
Figura 6.28 - Microdureza para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h	88
Figura 6.29 - Microdureza para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h	88
Figura 6.30 - Microdureza para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h	89
Figura 6.31 - Microdureza para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h	90
Figura 6.32 - Microdureza para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h	90
Figura 6.33 - Microdureza para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h	91
Figura 6.34 - MEV para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min	92
Figura 6.35 - MEV para Rebolo de Óxido, sem refrigeração (a seco)	92
Figura 6.36 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h	93
Figura 6.37 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h	93
Figura 6.38 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h	93
Figura 6.39 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h	94
Figura 6.40 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h	94
Figura 6.41 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h	94
Figura 6.42 - MEV para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min	95
Figura 6.43 - MEV para Rebolo de CBN, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h	95
Figura 6.44 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h	95
Figura 6.45 - MEV para Rebolo de CBN, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h	96
Figura 6.46 - MEV para a peça Torneada e com Tratamento Térmico	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de grãos abrasivos com elevada dureza (Felipe Jr., 1992).....	8
Tabela 3 – Composição química do aço ABNT 4340 (%)	41
Tabela 3 – Seqüência de ensaios	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a – penetração do rebolo na peça	[mm]
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas	
a_d – profundidade de dressagem	[μ m]
Al₂O₃ - óxido de alumínio	
b – largura de retificação	[mm]
b_d – largura de atuação do dressador	[mm]
CBN – nitreto cúbico de boro	
CNC - comando numérico computadorizado	
d_s – diametro do rebolo	[mm]
d_w – diâmetro da peça	[mm]
ϵ – partição de energia	[%]
F_t – força tangencial de corte	[N]
G – relação G	[-]
h_{eq} – espessura equivalente de corte	[mm]
l_c – comprimento de contato	[mm]
MQL – Mínima Quantidade de Lubrificação	
n – rotação do rebolo	[RPM]
P_{elet} – potência elétrica	[W]
R_a – rugosidade média	[μ m]
RMS – Root Mean Square	
τ_r – tensão residual normal	[MPa]
t_s – tempo de centelhamento	[s]
u_{cl} – energia específica total de retificação	[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]
V_{ar} – velocidade do ar comprimido	[m/s]
V_f – velocidade de avanço	[mm]
Q_{fluido} – vazão do fluido de corte	[ml/h]
V_s – velocidade de corte	[m/s]
V_w – velocidade da peça	[m/s]
ω_w – rotação da peça	[RPM]

RESUMO

A utilização dos fluidos de corte exige certos cuidados, pois os convencionais atualmente empregados, apresentam em sua composição química produtos que podem gerar doenças aos operadores e trazer prejuízos ao meio ambiente. A manutenção e o descarte dos fluidos apresentam custos elevados. O presente trabalho utilizou um tipo de fluido de corte de origem vegetal isento de substâncias tóxicas, e visa utilizar uma nova técnica de aplicação de fluido de corte, a Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) na retificação cilíndrica externa de mergulho de um aço ABNT 4340 temperado e revenido, utilizado comercialmente na fabricação de eixos, virabrequins e engrenagens cujas solicitações mecânicas são elevadas. A MQL é um método que utiliza uma quantidade menor de fluido de corte com relação aos métodos convencionais e já vem sendo pesquisada em outras operações de usinagem como o fresamento e torneamento. A otimização da aplicação do fluido de corte exigiu a confecção de um bocal especial que permitiu a mistura de fluido com ar comprimido, formando assim uma névoa. Utilizou-se dois tipos de aplicação de fluido de corte (MQL e convencional) e dois rebolos (CBN e Al_2O_3), obtendo-se como parâmetros de saída a força tangencial de corte, energia específica e a integridade superficial do material retificado. Com relação à integridade superficial analisou-se a rugosidade, a circularidade, a microdureza, a tensão residual e a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados alcançados com a MQL mostraram-se promissores na retificação com os parâmetros utilizados.

Palavras chave: Retificação, fluido de corte, mínima quantidade de lubrificação, integridade superficial, otimização.

ABSTRACT

The use of cutting fluids demands certain cares, because some of them can contain in their chemical composition products that cause illnesses to the operators and bring damages to the environment. The maintenance and the discarding of this kind of fluids generates high costs. The present work used a type of vegetal cutting fluid free from toxic substances, and aims at to apply a new technique of cutting fluid application, the Minimum Quantity of Lubrification (MQL) in the external cylindrical plunge grinding of a tempered and annealed ABNT 4340 steel, used commercially in the manufacturing of shafts, crankshafts and gears with high mechanical loads. The MQL is a method that uses a lesser amount of cutting fluid than the conventional methods. A special nozzle was made to allow the mixture of the cutting fluid with the compressed air forming a misty. This work used a CBN and Al_2O_3 wheel and two types of fluid application (MQL and conventional). It was observed the influence of the MQL and conventional methods in the tangential cutting force, specific energy and superficial integrity of the ground material (roughness, roundness, residual stress and SEM). The results demonstrated the effectiveness of the MQL method for the input parameters used in this study.

Keywords: Grinding, Cutting Fluid, Minimum Quantity of Lubrification, Surface Integrity, optimization.

1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação é conhecido como um dos mais complexos processos de usinagem, devido ao grande número de variáveis envolvidas.

A busca por produtividade e qualidade nos últimos anos, tem resultado em grandes avanços nos processos de usinagem. Tais avanços ocorrem tanto nas operações convencionais como também na simplificação da seqüência de fabricação de um componente com a substituição de operações intermediárias pelas de acabamento.

De acordo com Webster e Ciu (1995), a aplicação do fluido em processos de retificação está se tornando mais importante devido às elevadas taxas de remoção, alta qualidade e longa vida do rebolo.

O crescente aumento das velocidades de corte empregados nas máquinas de usinagem, faz com que uma maior quantidade de calor seja gerada no processo, fazendo com que o tipo de fluido de corte e sua forma de aplicação tenham grande relevância.

Os fluidos de corte são utilizados como um “agente externo” às condições de usinagem. Os papéis do fluido em operações de usinagem são: refrigerar a peça de trabalho, retirar os cavacos, lubrificar a zona de usinagem, refrigerar e limpar o rebolo. Geralmente a energia de usinagem é dissipada no cavaco, na peça, no rebolo e no fluido. Porém, a eficiência de um fluido de corte dependerá principalmente do tipo de fluido empregado.

Há disponível no mercado uma grande diversidade de óleos e fluidos de corte para os diferentes processos de usinagem. Diversos fatores influem na escolha do melhor fluido, como viscosidade, características técnicas, custo, etc., e mesmo após a escolha do mesmo, ainda existem outras considerações que devem ser feitas para melhor aproveitamento deste fluido. Entre as características citadas destacam-se: a geometria do bocal pelo qual o fluido é introduzido na operação, intensidade de pressão e vazão na saída do bocal, posicionamento do bocal, entre outras, sendo todas de substancial importância para a melhoria da qualidade final da peça.

Com o desenvolvimento da indústria mecânica, os fluidos de corte tiveram de ser aprimorados e hoje existem produtos que são composições complexas, contendo agentes químicos que variam de acordo com o tipo de operação a ser executada e os metais a serem trabalhados. Segundo Mayer & Fang (1993), Jahanmir & Strakna (1993), devido às pressões exercidas por agências de proteção ambiental e de saúde, os fabricantes de fluidos de corte vêm gerando produtos mais saudáveis ao operador de máquinas-ferramenta e menos danosos ao meio ambiente.

Os métodos convencionais de aplicação dos fluidos de corte são pouco eficientes, especialmente sob condições de aplicação severas. A energia armazenada nos fluidos durante a sua aplicação não é suficiente, na maioria dos casos, para vencer a força centrífuga do rebolo ou penetrar na barreira de ar que circunda o mesmo em movimento. Segundo Guo & Malkin (1992), isso produz como resultado uma eficiência na utilização dos fluidos de corte na faixa de 5 a 30%. Caso ocorra uma ineficiente lubrificação e refrigeração da interface rebolo-peça, ocorre um aumento do número de afiações do rebolo (dressagem ou perfilamento, dependendo do tipo de rebolo utilizado) durante uma dada operação de retificação. Com isso, têm-se um desgaste prematuro do rebolo pois, segundo Kovacevic & Mohan (1995), do percentual de desgaste volumétrico de um rebolo, apenas 10% ocorre durante a usinagem propriamente dita. O restante é perdido durante o processo de afiação.

Os fluidos de corte para usinagem baseados em emulsão ainda são usados em grande quantidade na indústria de processamento metal-mecânica, gerando elevados custos de consumo e descarte, além do prejuízo ambiental. A necessidade cada vez maior de uma técnica de produção não agressiva ao meio ambiente e o crescimento rápido dos custos de disposição dos fluidos de corte têm justificado a demanda por uma alternativa ao processo de usinagem com fluido de corte. Na última década, porém, as pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso de fluidos refrigerante e/ou lubrificante na produção metal/mecânica (Sahm & Schneider, 1996; Dunlap, 1997; Klocke et al., 1998; Machado & Diniz, 2000).

A tendência mundial é produzir peças cada vez mais sofisticadas, com elevado grau de tolerância geométrica, dimensional e acabamento superficial, com baixo custo e sem poluir o meio ambiente. Assim os fluidos de corte que normalmente são utilizados para a operação de retificação, são descartados direta ou indiretamente no meio ambiente, o que nos dias atuais não é mais viável pelo rigor das leis, da fiscalização e de um novo conceito de produzir com a adoção do “selo verde”. Este indica se os processos utilizados para a produção de uma determinada peça não prejudicam o meio ambiente e, dessa forma, a utilização em massa de fluidos de corte tende a diminuir com o passar do tempo, tornando-se necessário pesquisas a respeito de tal assunto para que se diminua a participação de tais fluidos no setor produtivo e, conseqüentemente, no meio ambiente. Por outro lado, a concorrência global está obrigando as indústrias nacionais a atender aos padrões internacionais de qualidade e impactos ambientais. Para tanto, é necessária uma análise mais profunda das conseqüências desse tipo de alteração no estado final da peça usinada.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é o estudo comparativo da lubri-refrigeração convencional com a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) na retificação cilíndrica externa de mergulho, utilizando-se um rebolo convencional de óxido de alumínio (Al_2O_3) e um superabrasivo (CBN). A avaliação do desempenho foi através da análise do comportamento de variáveis de saída como a força tangencial de corte, a energia específica, o desgaste diametral do rebolo e a integridade superficial (rugosidade, circularidade, microdureza, microestrutura e tensão residual).

Dentre os principais objetivos deste trabalho pode-se citar:

- ✓ Avaliar o desempenho quando da utilização de rebolos convencionais e superabrasivos;
- ✓ Desenvolvimento de um bocal especial para a aplicação do fluido de corte utilizando-se da técnica da MQL;
- ✓ Avaliar o comportamento da MQL no processo de retificação a fim de se atender as normas ambientais sem prejuízo da qualidade da peça.

Com base nos resultados previstos, diversas empresas do ramo poderão se beneficiar com o desenvolvimento da técnica aplicada a usinagem com ferramentas de geometria não definida. Esta técnica sugere uma racionalização e correta aplicação da quantidade de fluido de corte utilizado no processo de retificação.

3. JUSTIFICATIVA PARA REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO

Atualmente o processo de retificação utiliza grandes volumes de fluido de corte, que requerem altos custos de manutenção e descarte, podendo afetar o meio ambiente de maneira significativa quando descartados incorretamente. Deste modo, o presente projeto pretende explorar o conceito da mínima quantidade de lubrificante (MQL) no processo de retificação, desenvolvendo uma metodologia otimizada de aplicação de fluido através da construção de um bocal especial, pelo qual uma quantidade mínima de fluido de corte é pulverizada em um fluxo de ar comprimido, a fim de racionalizar a utilização de fluido de corte na retificação o que seria de grande interesse econômico para as empresas.

Além do aspecto ambiental, pretende-se analisar o comportamento do processo comparando os resultados da mínima quantidade de lubrificante com os da lubri-refrigeração convencional, utilizado atualmente nas indústrias.

Assim, tais resultados permitirão analisar uma possível alternativa de aplicação de fluido de corte no processo de retificação, onde várias empresas poderão se beneficiar com o desenvolvimento e aplicação da técnica, pois esta sugere uma redução na quantidade de fluido de corte utilizado, procurando-se obter condições que não comprometam o estado final da peça retificada. Desta forma as empresas poderão economizar fluido de corte sem alteração da qualidade de seus produtos, com custos reduzidos, sem prejudicar o meio ambiente e os operadores de máquinas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo tem-se a intenção de apresentar alguns conceitos sobre o processo retificação cilíndrica externa de mergulho, as variáveis de entrada e saída envolvidas, aspectos de seleção e formas de utilização de rebolos convencionais e superabrasivos de CBN, tipos e diferenças entre os bocais existentes para aplicação de fluido de corte, otimização dos fluidos de corte, aplicação da técnica da Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) nos processos de usinagem e integridade superficial do material retificado, como rugosidade, circularidade, microestrutura, tensão residual e microdureza.

4.1. Variáveis no Processo de Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho

4.1.1 Mecanismo de formação do cavaco

Segundo Malkin (1989), o mecanismo de formação do cavaco por um grão abrasivo o qual desliza sobre a superfície gerada apresenta um desgaste de área de topo conforme Figura 4.1.

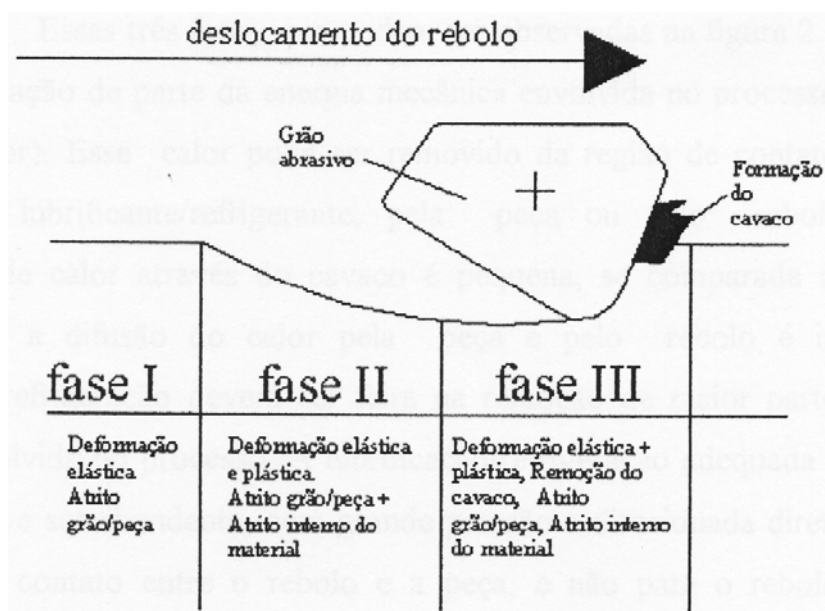


Figura 4.1 - Formação do cavaco por um grão abrasivo, (MALKIN, 1989)

A extensão de cada uma destas fases depende de fatores relacionados às características de agressividade do rebolo e aos parâmetros de operação utilizados (penetração do rebolo na peça e velocidade de corte e da peça).

Essas três fases, que podem ser observadas na Figura 1, são fontes de transformação de parte da energia mecânica envolvida no processo em energia térmica (calor). Este calor pode ser removido da região de contato pelo cavaco, pelo refrigerante, pela peça ou pelo rebolo. Como a quantidade de calor retirada pelo cavaco é pequena e a dissipação do calor pela peça e pelo rebolo é indesejável a refrigeração deverá remover grande parte da energia térmica envolvida no processo. A refrigeração adequada para realizar tal tarefa deve ser abundante, com grande pressão e direcionada diretamente para a região de contato entre o rebolo e a peça, e não para o rebolo ou para a superfície da peça, que fica após a região de contato.

4.1.2 Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})

Segundo Peters & Decneut (1975) apud Oliveira (1988), a espessura da camada de material removida pelo rebolo numa volta completa denomina-se de espessura equivalente de corte h_{eq} , e é um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho, sendo ainda definido como a relação entre a taxa de remoção específica do material Q_w' e a velocidade de corte. Desta forma, de acordo com Graf (2004), a espessura equivalente de corte para o processo de retificação cilíndrica externa pode ser representada pela Equação 1.

$$h_{eq} = \frac{Q_w'}{V_s} = \frac{\pi * d_w * V_f}{60 * 1000 * V_s} \quad (1)$$

Segundo Malkin (1989), a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada com o comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas como: forças de corte, rugosidade, vida da ferramenta etc. Diniz et al. (2000) afirma que um aumento do h_{eq} reflete no respectivo aumento das forças de corte, rugosidade e diminuição da vida do rebolo. Deste modo, busca-se sempre utilizar rebolos cujas ligas suportem elevadas rotações de trabalho a fim de se melhorar a rugosidade, aumentar a vida útil da ferramenta e diminuir os esforços de corte.

4.1.3. Arco ou Comprimento de Contato (l_c)

Define-se a região de contato entre a peça e a ferramenta como arco ou comprimento de contato, podendo ser calculado através da Equação 2.

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

onde: a é a penetração do rebolo na peça;

d_s é o diâmetro do rebolo.

Segundo Diniz et al. (1999) a pressão gerada durante a retificação é distribuída entre os grãos abrasivos do rebolo de forma que quanto maior for o comprimento de contato menor será a pressão sobre cada grão abrasivo, assim se o comprimento de contato é aumentado pode-se aumentar a porosidade do rebolo e o tamanho dos grãos com a mesma pressão.

4.2. Rebolos

Segundo Nussbaum (1988) e Malkin (1989), rebolo é a ferramenta de corte utilizada no processo de retificação. Tal ferramenta é composta basicamente de grãos abrasivos de elevada dureza que efetuam o corte, presos a uma matriz aglomerante de um material mais mole.

O desempenho e as propriedades dos rebolos são dependentes dos seguintes fatores: material do grão abrasivo bem como o seu tamanho, material aglomerante, propriedades do abrasivo, do aglomerante e da porosidade (espaço vazio entre os grãos abrasivos no aglomerante). Um abrasivo usina um metal quando sua dureza é no mínimo 1,2 vezes maior. A identificação dos rebolos é feita através de um código alfa-numérico (Malkin, 1989; Oliveira, 1998; Hitchiner, 2001).

Os rebolos são definidos pelas seguintes características: material e tamanho dos grãos abrasivos, dureza, estrutura do rebolo e do material aglomerante.

A classificação dos grãos abrasivos é baseada na dureza dos materiais sendo dividida em dois grupos: convencionais e superabrasivos. Os grãos abrasivos convencionais apresentam durezas próximas à 2.000 kgf/mm² (Knoop), enquanto que os superabrasivos apresentam durezas superiores à 4.500 kgf/mm² (Knoop) (Shaw, 1994; Carius, 1999).

Na tabela 1 é apresentada uma comparação entre as propriedades mecânicas e térmicas dos grãos superabrasivos e convencionais.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de grãos abrasivos com elevada dureza (Felipe Jr., 1992)

Tipo de material abrasivo	Dureza na escala Knoop (kgf/mm²)	Resistência à compressão (kN/cm²)	Condutibilidade térmica (cal/°C.cm.s)
Diamante	8.000	870	5.0
CBN	4.500	650	3.3
Óxido de Alumínio	2.500	350	0.08
Carbeto de Silício	2.700	150	0.1
Carbeto de Tungstênio	2.100	350	0.08

Segundo Schuitek et al. (2001), os rebolos de CBN vêm ganhando grande aplicação na produção fabril principalmente para a retificação de aços temperados, uma vez que as principais vantagens no uso destes rebolos no processo de retificação são:

- ✓ durabilidade do grau de afiação (e conseqüentemente do rebolo);
- ✓ diminuição nos tempos de preparação e ajustagem da máquina;
- ✓ diminuição das alterações microestruturais;
- ✓ melhores acabamentos superficiais nas peças;

Porém, de acordo com Bianchi et al. (2001), deve-se salientar que embora os rebolos superabrasivos tenham muitas vantagens, quando comparados aos rebolos convencionais, estes não podem ser aplicados em todos os processos de retificação, sendo usados principalmente na retificação de metais ferrosos endurecidos, ferro fundido e superligas de níquel e cobalto. Já os rebolos convencionais são empregados na retificação de aços carbono, aço liga, aço rápido, ferro fundido maleável e nodular, bronze duro etc.

4.2.1. Dressagem do Rebolo

Após algum tempo de utilização do rebolo em operações de retificação, os mesmos podem não apresentar condições ideais de utilização, podendo apresentar grãos gastos, não estar numa forma desejada dificultando o corte e os poros podem estar impregnados de cavaco, de modo que a produção de novos cavacos dificultada ocasionando problemas nas peças. Quando as peças retificadas começam a apresentar problemas de acabamento, erros de

forma ou de tolerância, normalmente realiza-se a dressagem, a fim de corrigir a superfície do rebolo e devolver-lhe as características de afiação e o restabelecimento do perfil original.

Para realizar a dressagem do rebolo são utilizados diversos tipos de ferramentas denominadas dressadores ou retificadores que incluem: cortadores metálicos (rosetas), bastões retificadores, ponta única de diamante, dressadores do tipo placa multigranular (*fliese*), roletes estacionários e giratórios de diamante e roletes de esmagamento

Os rebolos sofrem uma preparação antes de serem utilizados para retificação, sofrem operações de perfilamento e dressagem. O perfilamento consiste na remoção do material da superfície do rebolo, ajustando a sua forma. A dressagem é feita para a obtenção de um determinado comportamento da retificação. Em rebolos convencionais, tais operações são realizadas juntas e são denominadas apenas por dressagem, já para rebolos superabrasivos as operações são realizadas separadamente (Malkin, 1989).

A necessidade do processo de dressagem está na recomposição da geometria e na restauração da condição superficial desejada (agressividade do rebolo), uma vez que para operações de retificação de precisão, tolerâncias apertadas e bons acabamentos é necessário um controle cuidadoso da geometria e do acabamento da superfície do rebolo. O fenômeno da auto-afiação consiste na exposição de novas arestas de corte, através da fratura do grão abrasivo e do aglomerante pelos esforços de corte. Tal fenômeno é necessário, uma vez que a superfície do rebolo desgasta-se de forma desigual devido à orientação aleatória dos grãos abrasivos, esforços de corte heterogêneos e diferentes necessidades de remoção de material (King & Hahn, 1992).

4.3. Fluidos de corte

4.3.1. Classificação dos fluidos de corte

Cada tipo básico de fluido de corte apresenta características distintas. Entretanto, as características que distinguem as diferentes classes nem sempre são de fácil visualização, existindo pequenas diferenças quanto à classificação dos mesmos (Motta & Machado 1995). Segundo Runge & Duarte (1990) e ASM (1991), os fluidos de corte podem ser agrupados em quatro tipos básicos:

- ✓ 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;

Os óleos de corte têm como composto básico o óleo mineral, podendo ser usados no estado puro (sem aditivação) ou aditivado (presença de aditivos polares e/ou aditivos químicos ativos ou inativos). Atualmente estes óleos apresentam base parafínica, em sua maioria, pois segundo Webster (1995), os compostos aromáticos policíclicos, se não forem destruídos durante o processo de formação do óleo de corte, pela forte hidrogenação, podem causar câncer ou dermatites. Estes óleos 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 fluidos de corte solúveis em água transformam-se em misturas, quando seu concentrado é diluído em água. Estas misturas variam entre emulsões e soluções dependendo da constituição básica do concentrado (óleo mineral ou sais orgânicos e inorgânicos, respectivamente), da presença e da quantidade de emulgadores no mesmo. 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.

Nas emulsões, o óleo mineral está disperso na água em forma de gotículas, devido à presença de emulgadores, os quais “quebram” o óleo mineral em minúsculas partículas (gotículas), mantendo-as dispersas e conferindo às mesmas cargas repulsivas, evitando a sua coalescência (união das gotículas de óleo e separação da fase oleosa da aquosa). Apresentam menor poder lubrificante e maior poder refrigerante que o óleo de corte. Todavia necessitam de cuidados especiais quanto à qualidade da água utilizada, ao controle de microrganismos (bactérias e fungos), ao pH e à concentração da emulsão.

Os óleos semi-sintéticos são combinações de fluidos sintéticos e emulsões em água. Atualmente, estes fluidos são composições de fluidos sintéticos que contém somente uma pequena porcentagem de óleo mineral emulsionável, variando de 5 a 30% do total do fluido concentrado, o qual é adicionado a fim de propiciar uma emulsão estável, translúcida e composta de minúsculas gotículas de óleo. Os óleos semi-sintéticos combinam algumas das

propriedades dos fluidos sintéticos e dos óleos emulsionáveis. As principais desvantagens são a lubrificação insuficiente em determinadas operações, bem como a formação de compostos insolúveis, quando a água utilizada no preparo da emulsão semi-sintética apresentar dureza elevada (alta concentração de CaCO_3). Possuem também um melhor controle de oxidação que as emulsões convencionais.

Os fluidos sintéticos são soluções químicas constituídas de materiais (sais) orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água, não contendo óleo mineral. Em geral, permitem rápida dissipação de calor, bom controle dimensional, excelente poder detergente e visibilidade da região de corte, facilidade no preparo da solução, elevada resistência à oxidação do fluido e à 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. O baixo poder lubrificante, a formação de compostos insolúveis e de espuma para determinadas operações de usinagem podem ser caracterizadas como desvantagens na utilização deste tipo de fluido.

Entre os gases, o ar é o fluido gasoso mais comum. Alguns gases, como o argônio, hélio e nitrogênio são utilizados, em alguns casos, para prevenir a oxidação da peça e dos cavacos. Gases como o CO_2 , que possuem ponto de ebulição abaixo da temperatura ambiente, podem ser comprimidos e injetados na região de corte, promovendo a sua refrigeração. Porém, grandes gradientes térmicos devem ser evitados, impedindo-se distorções das peças, surgimentos de tensões residuais etc. Contudo, pesquisas vem sendo realizadas, visando-se adequar a possibilidade da real utilização destes gases em larga escala, segundo os requisitos de qualidade e produtividade para as peças usinadas.

Na tabela 2 são apresentadas algumas características básicas dos quatro principais tipos de fluidos de corte utilizados em retificação (Webster, 1995). As propriedades lubrificantes e refrigerantes são as que mais contribuem para uma boa refrigeração. Entretanto, as demais devem ser consideradas antes da escolha do fluido a ser utilizado.

Tabela 2 – Características dos fluidos de corte (1-pior; 4-melhor) (Webster, 1995)

	Fluidos sintéticos	Fluidos semi-sintéticos	Emulsões	Óleos de corte
Remoção de calor	4	3	2	1
Lubrificação	1	2	3	4
Manutenção	3	2	1	4
Facilidade de filtração	4	3	2	1
Aspectos ambientais	4	3	2	1
Custo	4	3	2	1
Aumento da vida do rebolo	1	2	3	4

4.3.1.2. Funções do fluido de corte

De acordo com Runge e Duarte (1990), as principais funções dos fluidos de corte são:

- ✓ Melhorar a integridade superficial;
- ✓ Refrigeração;
- ✓ Lubrificação;
- ✓ Remoção dos cavacos da área de corte;
- ✓ Redução do desgaste das ferramentas;
- ✓ Proteção contra a corrosão (máquina, ferramenta e peça).

A refrigeração do processo é função primária dos fluidos de corte. O mesmo atua visando a remoção de calor da área de contato entre a ferramenta e a peça, aumentando a vida da mesma, garantindo maior precisão dimensional das peças por meio da redução das distorções térmicas ocorridas. As pressões geradas durante a usinagem são em torno de 1,4 GPa, onde aproximadamente 75% do calor gerado é devido à deformação do material e outros 25% do calor gerado é resultado do atrito da ferramenta com o cavaco. Em situações onde o calor gerado não é retirado de maneira efetiva, excessivas dilatações térmicas ocorrerão na peça, resultando também em elevado desgaste da ferramenta, gerando repetitivas operações de manutenção (Runge e Duarte, 1990).

Na interface cavaco-ferramenta há ondulações nas superfícies em forma de vales e picos. Assim o fluido de corte penetra na região compreendida entre ferramenta e peça, reduzindo o atrito, diminuindo o consumo de energia e a geração de calor.

Segundo Monici (2003) alguns pré-requisitos básicos são necessários aos fluidos de corte para atingirem uma boa lubrificação, responsável pela diminuição do atrito da ferramenta com a peça, proporcionando como consequência, uma menor geração de calor e uma baixa força de corte. Um outro pré-requisito é o poder de refrigeração apresentado pelo fluido de corte, impedindo que a peça atinja temperaturas excessivamente elevadas, podendo causar-lhe muitas vezes algum dano térmico. Além disso, o fluido de corte facilita a remoção de cavacos gerados na zona de contato ferramenta-peça. Dessa forma o fluido de corte pode prevenir um possível contato entre os grãos abrasivos e os cavacos gerados.

Na Figura 4.2 são apresentadas as principais funções que os fluidos de corte devem apresentar no processo de retificação.

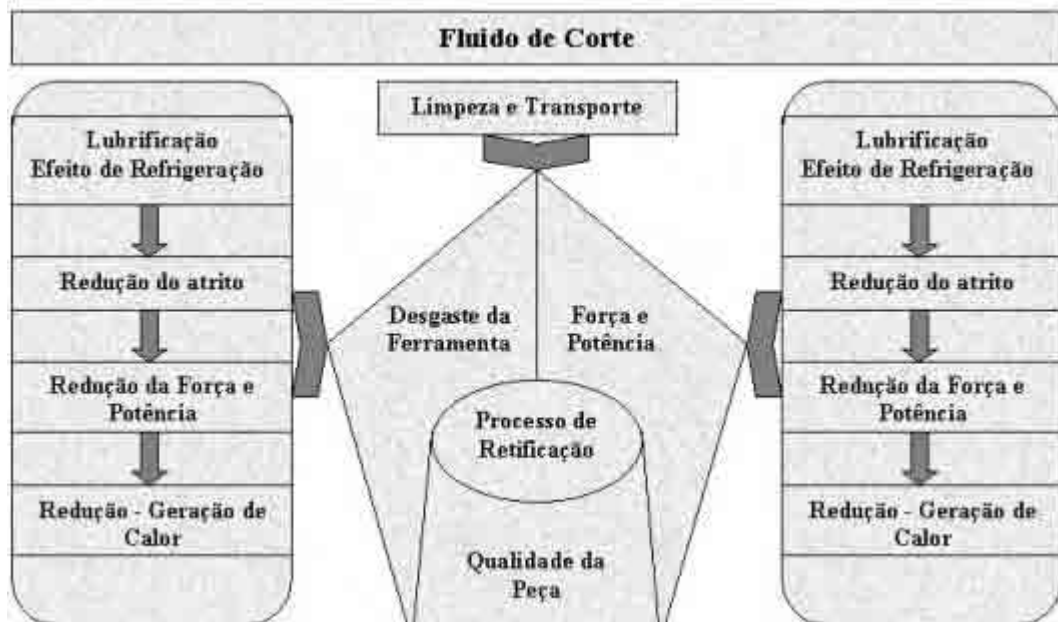


Figura 4.2 - Funções do fluido de corte no processo de retificação (Monici, 2003 - adaptado)

4.3.1.3. Aspectos ambientais quanto à utilização de fluidos de corte

Comprovando-se a tendência de preocupação ambiental na utilização de máquinas-ferramenta, conforme relatado por Simon (1999), constatou-se a grande ênfase dada à tecnologia ambiental, ou seja, à preservação do meio ambiente no campo de abrangência da máquina-ferramenta e a busca da conformidade com a norma ISO 14000. De forma mais específica, segundo Simon (1999), uma atenção especial vem sendo voltada à realização de um processo de usinagem não-agressiva ao meio ambiente, priorizando-se tecnologias relacionadas à usinagem a seco, usinagem com mínima quantidade de fluido de corte e

usinagem com ar resfriado. Soma-se a este movimento os novos métodos para manuseio e tratamento dos cavacos que facilitam o descarte, recuperam o fluido de corte e reduzem a necessidade de espaço e a influência do calor na máquina e na peça.

Atualmente, existe uma tendência mundial, principalmente nos países europeus, de redução da utilização de óleos de corte devido ao elevado custo, mas principalmente pelos riscos que podem causar à saúde humana (Webster 1995). O uso de cloro em fluidos de corte vem encontrando restrições em alguns países, como na Alemanha, em virtude dos danos que os compostos clorados podem causar, quando de seu descarte incorreto. Os solventes clorados têm fácil penetração no solo, podendo existir e acumular-se por um longo período. Podem facilmente atingir o lençol freático para contaminá-los totalmente. O descarte de um quilograma de solvente clorado pode envenenar quarenta mil metros cúbicos de água. Na Alemanha existe uma legislação muito severa quanto ao descarte de hidrocarbonetos clorados. Segundo Runge & Duarte (1990), as parafinas cloradas, tal como usadas em fluidos de corte, estão incluídas. A concentração máxima permitida para descarte de óleos usados é de 0,5% de cloro total. Acima destes valores, o material deve ser incinerado em temperaturas superiores a 1100 °C para evitar a formação de dioxinas. A utilização dos óleos de corte integrais está limitada a operações de usinagem de metais de difícil usinabilidade, retificação de formas e nos casos onde os demais fluidos de corte não propiciam bons resultados.

Os fluidos de corte utilizados em ambientes fabris podem trazer efeitos negativos à saúde dos operadores de máquinas. Segundo Howes et al. (1991), os danos mais comumente relatados são problemas dermatológicos (Bennett, 1983; Gadian, 1983, apud Howes et al., 1991), mas efeitos respiratórios e pulmonares também são detectados, devido à exposição prolongada aos fluidos de corte (Baden, 1990, apud por Howes et al., 1991). Todavia, alguns pesquisadores sugerem que os riscos oferecidos pelos fluidos de corte podem ser pequenos (Rossmoore, 1981, apud Howes et al., 1991).

Segundo Howes et al. (1991), dentre as substâncias perigosas encontradas em fluidos de corte, as nitrosaminas estão entre as mais tóxicas e foram identificadas como cancerígenas. As nitrosaminas são formadas nos fluidos de corte pela reação entre o nitrito de sódio, um inibidor de corrosão, e as etanolaminas. A névoa formada durante a operação de retificação pode trazer sérios riscos à saúde devido à exposição dermatológica e respiratória, ressalta-se que, nos EUA, o nitrito de sódio teve seu uso industrial proibido. Outras substâncias perigosas encontradas em fluidos de corte, as quais são produzidas durante a retificação, incluem: os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e os hidrocarbonetos clorados.

4.3.1.4. Otimização da Aplicação de Fluidos de Corte

Segundo Howes et al. (1991), os impactos ambientais causados pelas indústrias não eram considerados como fatores técnicos decisivos para execução de um determinado projeto, porém tal fato está se modificando expressivamente. De acordo com as opiniões públicas e regulamentações governamentais, as indústrias estão passando a assumir uma postura diferente com relação à disposição de seus rejeitos industriais.

De acordo com Howes et al. (1991), os fluidos de corte utilizados nas indústrias são considerados como fatores de risco, principalmente para os trabalhadores, sendo que na maioria dos casos, os principais efeitos gerados pelo contato do trabalhador com tal substância são a ocorrência de danos dermatológicos e respiratórios. Os danos dermatológicos ocasionados pelos fluidos de corte podem ocorrer basicamente de duas formas: irritação da pele, pelo contato, totalizando de 50 a 80% de todos os casos, e efeitos alérgicos, devido a esse contato, que correspondem de 20 a 80% dos casos. A irritação da pele é ocasionada pelo contato constante com a substância do fluido, porém tais efeitos podem ser reduzidos pela não exposição constante da pele com o fluido. Ressalta-se que a alergia é ocasionada pela intolerância da pele do trabalhador perante as substâncias químicas presentes nos fluidos, onde tal alergia não é passiva de nenhum tipo de tratamento que possa eliminá-la completamente.

Segundo Campbell (1995), a qualidade da peça e o custo estão intimamente relacionados com a forma de aplicação do fluido de corte na região de corte. A otimização da forma de aplicação do fluido de corte no processo é um fator de extrema importância com relação ao custo global envolvido no processo, além de sua relação com o meio ambiente e o ambiente de trabalho gerado. Em situações nas quais o fluido de corte não é aplicado de forma correta, a peça pode ser danificada termicamente, pela queima e tensionamento superficial. A retificação é frequentemente uma das últimas operações realizadas na peça durante seu processo de fabricação global, assim caso uma peça seja excessivamente tensionada durante a retificação, todos os parâmetros previamente adicionados ao processo são eliminados e uma nova metodologia deve ser elaborada, para que assim sejam alcançados os resultados desejados.

Pequenas taxas de remoção de material e elevado custo podem ser geradas caso o fluido de corte não seja efetivamente utilizado durante processo, ou seja, quando o fluido de corte não penetra na região de corte de maneira coerente, o desempenho do processo como um todo diminui pela falta da retirada de calor e lubrificação.

Geralmente a importância da aplicação do fluido de corte é observada de maneira superficial. Em situações de não aplicação otimizada, o fluido não fornece suas propriedades de lubrificação, refrigeração e limpeza apropriada da superfície do componente usinado. Há poucos exemplos na literatura que descrevem a aplicação do fluido de corte com detalhes específicos. Isto porque não há métodos práticos de medição do efeito das variáveis envolvidas no processo, com relação à quantidade de fluido de corte que pode ser utilizada. Recentemente tem sido polêmico o debate a respeito da quantidade de fluido de corte que deve ser aplicado ao processo, podendo-se citar alguns temas envolvidos como a velocidade do fluido, velocidade da ferramenta, ângulo do bocal, mínima quantidade de lubrificante/refrigerante (MQL - MQR), melhoria do projeto do bocal, tipo de fluido de corte, etc.

De acordo com Webster et al. (1995), a seleção de um eficiente modo de aplicação é considerado uma das formas de se encontrar metas de produtividade que podem ser tão importantes quanto às especificações da ferramenta de corte. A correta aplicação dos fluidos reduz a queima, pela diminuição da energia específica e redução do contato da zona termicamente afetada.

Segundo Webster et al. (1995), um jato de fluido incidindo de forma direta sobre a região de corte é capaz de reduzir de forma significativa a temperatura na região de corte, porém altas velocidades do jato de fluido são necessárias para a penetração do fluido de maneira efetiva, na região de corte. Com a utilização de um bocal de formato circular, constatou-se a redução acentuada da temperatura na região de corte, quando comparado com o jato convencional. Foi comprovado também que o ângulo de incidência do jato na região de corte não altera de maneira significativa a refrigeração da peça. Porém, alta velocidade periférica da ferramenta com relação ao jato é muito significativa no processo de refrigeração da peça. Um outro problema que deve ser analisado é a barreira de ar existente entre o bocal e a peça que deve ser vencida pelo fluido de corte, ocasionando a dispersão do mesmo durante sua penetração na região de corte, fazendo-se novamente necessário, a utilização de um bocal eficiente para evitar tal ocorrência.

Deve ser levada em consideração a abertura geométrica do bocal na entrada e saída do fluido, bem como as superfícies internas, sendo que se as mesmas forem de superfície geométrica côncava apresentarão um melhor efeito, pois estas tendem a aproximar as lâminas de fluido que se formam no interior do bocal. Isto diminui o efeito de turbulência do fluido de corte, ao contrário do bocal com superfície convexa, cuja tendência é de separar as lâminas de fluido formadas no interior do mesmo, aumentando o efeito de turbulência. Um outro aspecto

muito importante no desenvolvimento do bocal são os cantos próximos a abertura de saída do bocal, os quais contribuem para a formação da turbulência devido os cantos vivos. O bocal deve ser projetado de forma a causar a menor ocorrência de turbulência possível durante a saída do fluido (Webster et al., 1995; Monici, 2003).

4.3.1.5. A Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

Comprovando-se a tendência de preocupação ambiental quando da utilização dos fluidos de corte em máquinas-ferramenta, conforme relatado por vários pesquisadores e fabricantes de máquinas-ferramenta, constata-se a grande ênfase dada à tecnologia na área ambiental, ou seja, a preservação do meio ambiente e a busca da conformidade com a norma ISO série 14000. O desenvolvimento de formas alternativas não-nocivas de produção passa a ser de fundamental importância para a humanidade, uma vez que esse procedimento ajudará a conter os atuais níveis de poluição mundial. As alternativas tecnológicas experimentadas têm como finalidade otimizar o desempenho dos fluidos de corte e reduzir a sua influência negativa. Por outro lado, apesar das insistentes tentativas de eliminar completamente os fluidos refrigerantes, em muitos casos a refrigeração ainda é essencial para que se obtenham vidas econômicas de ferramentas e as qualidades superficiais requeridas, principalmente na retificação. Isto é particularmente válido quando há exigência de tolerâncias estreitas e alta exatidão dimensional e de forma. Isso faz da mínima quantidade de lubrificante (MQL) uma alternativa interessante, porque combina a funcionalidade da refrigeração (ar comprimido) com um consumo extremamente baixo de fluidos, geralmente de 10 até no máximo 100 ml/h uma pressão de 4,0 a 8,0 kgf/cm². A minimização de fluido de corte tem adquirido relevância nos últimos dez anos (Klocke Eisenblätiter, 1997; Young et al. 1997; Schulz, 1999; Simon, 1999; Dörr & Sahm, 2000; Klocke et al., 2000).

Nesta tecnologia, a função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração principalmente pelo ar comprimido. Esta pequena quantidade de fluido pode ser suficiente para reduzir o atrito no corte, diminuindo a tendência à aderência em materiais com tais características. De sua comparação com a lubri-refrigeração convencional resultam numerosas vantagens (Klocke & Eisenblatter, 1997; Klocke et al. 1998; Hieisel et al. 1998; Dörr, 1999 e Klocke et al. 2000):

- ✓ A quantidade de fluido de corte em relação ao volume da peça usinada é muitas vezes menor do que no caso da refrigeração convencional;

- ✓ Baixo consumo de fluido de corte e eliminação de um sistema de circulação;
- ✓ Fluidos de corte não consumidos aumentam a necessidade de manutenção e problemas de despejo;
- ✓ Podem ser evitados materiais de filtragem e reciclagens da manutenção dos fluidos de corte;
- ✓ O baixo conteúdo de óleo que permanece nos cavacos não justifica a sua recuperação;
- ✓ As peças usinadas ficam quase secas, de maneira que em muitos casos é desnecessária uma operação de lavagem subsequente;
- ✓ A aplicação de biocidas e preservativos pode ser eliminada, porque apenas a quantidade de fluido de corte que será usada em um turno de trabalho deve ser colocada no reservatório do sistema de MQL.

Por outro lado, comparado com a lubri-refrigeração convencional, a MQL causa custos adicionais para pressurizar o ar e suportes tecnológicos, os quais são necessários no processo para superar as restrições tecnológicas da técnica MQL. Por exemplo, técnicas especiais para a retirada do cavaco podem ser necessárias, e talvez a produtividade seja reduzida devido ao impacto térmico nos componentes usinados. O vapor, a névoa e a fumaça de óleo gerados durante o uso da mínima quantidade de lubrificante na usinagem podem ser considerados subprodutos indesejáveis, pois contribuem para aumentar o índice de poluentes em suspensão no ar e tornaram-se fatores de preocupação, necessitando de um bom sistema de exaustão na máquina. Em virtude deste risco, o ambiente de névoa formado deve ser o menor possível. Na pulverização é utilizada uma linha de ar comprimido que funciona intermitentemente durante o processo. Essas linhas de ar geram um barulho que geralmente ultrapassa os limites admitidos pela legislação. Portanto, além de afetar a saúde do trabalhador, o barulho polui o ambiente e prejudica a comunicação durante a usinagem (Brockhoff & Walter, 1998; Novasky & Dörr, 1999; Machado & Diniz, 2000 e Klocke et al. 2000).

Uma drástica redução nos volumes empregados nas operações de usinagem contribui significativamente para a redução do impacto ambiental provocado por estas operações. O sucesso técnico-econômico de cada operação irá exigir uma adaptação nas características técnicas dos fluidos de corte adequadas a esta nova condição de trabalho. Todavia, cada processo e cada operação específica de usinagem exige uma solução particular, merecendo

estudos apropriados para cada caso (Klocke & Eisenblatter, 1997; Heisel et al. 1998; Weingaertner et al., 1999 e Dörr, 1999).

Uma outra vantagem da tecnologia de mínima quantidade de lubrificante é que não aparecem as tensões causadas por grandes gradientes de temperaturas, como no caso do fresamento e retificação com fluido de corte convencional. Isto é especialmente importante no caso de corte de materiais frágeis (Heisel et al. 1998).

Existem estudos que mostram que os custos da refrigeração são muito maiores do que os estimados. No caso de se utilizar uma nova tecnologia torna-se importante detalhar os custos dos investimentos, os custos fixos e os custos proporcionais por ano, para os sistemas de refrigeração. Os custos relativos à eliminação (descartar os fluidos de corte após o uso) também devem ser levados em conta. Com o conhecimento dos custos da usinagem úmida e os da usinagem com MQL, foi feita uma comparação de custos dos investimentos e dos custos fixos e proporcionais anuais na empresa BMW. A confrontação dos custos totais de investimento na linha “*transfer*”, inclusive do equipamento para limpeza de cavacos, comprovou vantagens financeiras de 22% na usinagem com a tecnologia MQL (Dörr & Sahm, 2000).

Esta técnica já é usada com sucesso há muitos anos em vários processos de corte, serramento e conformação de metais. As suas vantagens levam à previsão de que sua faixa de aplicações seja crescente, mas apesar de tudo, as variáveis de influência a serem consideradas e os efeitos sobre o resultado do processo têm sido matéria para apenas alguns poucos estudos. Nos sistemas de mínima quantidade são utilizados principalmente fluidos de corte não solúveis em água, principalmente óleos minerais. Deve-se considerar que, devido às quantidades muito pequenas de fluidos de corte usadas, os custos não deveriam impedir o uso de composições de alta tecnologia no campo dos óleos básicos e aditivos. Não é recomendável o uso de fluidos de corte que são desenvolvidos para sistemas convencionais, porque pode haver forte atomização e vaporização, o que é prejudicial à saúde dos operários. Particularmente, são necessárias informações sobre o tamanho e o tipo de partículas, vapor, névoa e fumaça de óleo. Quanto maior a velocidade de corte que juntamente à temperatura do processo, causam maiores problemas deste tipo, de maneira que, recomenda-se o uso de óleos básicos com uma viscosidade mais alta e adaptações no campo dos aditivos (anti-névoa). Os produtos lubrificantes devem ser ecologicamente corretos (isento de solventes e materiais fluorados) e com altíssima taxa de remoção de calor. Os materiais derivados de origem vegetal estão sendo cada vez mais empregados. Estes óleos, inalados com a formação do aerossol, diminuem os riscos à saúde (Heisel et al., 1998 e Novaski & Dörr, 1999).

Hafenbraedl & Malkin (2001) comprovaram que a técnica de MQL proporciona lubrificação eficiente, reduzindo potência de retificação e a energia específica para um nível comparável ou superior em desempenho ao obtido com óleo solúvel convencional (concentração de 5% com vazão de 5,3 l/min), ao mesmo tempo em que também reduz significativamente o desgaste do rebolo. A MQL também apresentou valores ligeiramente inferiores de rugosidade (Ra). O desempenho da retificação foi também avaliado na condição a seco. Os resultados com MQL foram obtidos no processo de retificação cilíndrica interna por mergulho em aço AISI 52100 temperado com dureza média de 60 HRc utilizando rebolo de óxido de alumínio. Esperava-se que a aplicação da MQL à retificação cilíndrica interna seria mais do que um desafio, devido à natureza contínua do processo, ao espaço limitado para acesso da lubri-refrigeração à zona de retificação e às dificuldades na remoção dos cavacos gerados na operação. Para a técnica de MQL, foi acoplado ao sistema de retificação um dosador de precisão, que fornece óleo de éster a uma taxa de fluxo especificada (12 ml/h). Um bocal mistura o óleo de éster com o ar comprimido a uma pressão de 69 kPa com a finalidade de formar uma névoa fina. A aplicação do óleo de éster para a retificação interna foi dificultada, em virtude do espaço limitado de acesso para o bocal. O projeto do bocal foi otimizado para ficar o mais próximo possível do lado de entrada da zona de retificação. Também foi utilizada uma pistola de ar frio, em uma tentativa de fornecer algum resfriamento da peça. O ar frio (-2⁰C) saía do bocal a uma taxa de fluxo de 3 l/s e uma pressão de 7,6 bar. Foi estimado, subsequente, que a quantidade disponível de ar frio não seria capaz de fornecer resfriamento significativo. Todavia, a principal desvantagem da MQL é com relação ao resfriamento, resultando em temperaturas elevadas e dilatação térmica da peça.

Baheti et al. (1998) realizaram experimentos com MQL utilizando óleo de éster (10 ml/h) com ar frio (-10⁰C na temperatura de saída) no processo de retificação plana por mergulho com rebolo de óxido de alumínio em peças de aço carbono. Os autores comprovaram que a técnica de MQL apresenta valores inferiores de energia de partição, temperatura e energia específica em comparação com a lubri-refrigeração convencional. Quando comparada com o óleo solúvel, a MQL com ar frio reduziu a energia específica em uma taxa de 10 a 15%, a temperatura da peça em 20 a 25% e a partição de energia para a peça (fração da energia de retificação que entra na peça como calor) em 15 a 20%. Foram realizados testes com diversas condições de lubri-refrigeração sendo: nitrogênio líquido; óleo solúvel (5% de concentração); a seco; óleo de éster; ar frio (-10⁰C) a uma vazão de 990 l/min com pressão de 690 kPa e ar frio + óleo de éster. A condição a seco apresentou maior valor de energia de partição, o que já era esperado. Por outro lado, a utilização de nitrogênio líquido

indicou-se maior valor de energia específica. Os pesquisadores concluíram que é possível eliminar ou reduzir o uso de fluido de corte na retificação contribuindo para uma manufatura limpa. Ambientalmente seguro, o óleo de éster foi capaz de fornecer boa lubrificação e quando aplicado junto com ar frio, a refrigeração é efetivamente comparável com o óleo solúvel. O óleo de éster é classificado como uma substância inofensiva à saúde e não-carcinógena. Ao mesmo tempo, a MQL comprova que é uma alternativa promissora para os fluidos de corte utilizados nos processos de retificação. Embora o nitrogênio líquido prove uma melhor refrigeração, o mesmo apresenta um baixo poder de lubricidade, o que resulta em alta energia específica. Pesquisa adicional é necessária para explorar as aplicações em potencial da técnica de MQL, principalmente no que se refere a aço endurecido, rebolos de CBN, retificação cilíndrica, altas taxas de remoção, integridade superficial, remoção de cavacos e fatores de custos.

Klocke et al. (2000) apresentaram o comportamento da força específica normal e tangencial na retificação externa de mergulho quando da comparação da refrigeração por bocal de sapata (24 l/min) e da técnica de MQL (215 ml/h). A técnica MQL resultou na redução da força específica normal e tangencial. No que se refere à microestrutura, revelaram que não foi observada nenhuma modificação quando da utilização das duas vazões. Por outro lado, a aplicação de MQL apresentou pior resultado de rugosidade (R_z) quando comparado com a refrigeração com grande quantidade. Os pesquisadores demonstraram através dos diversos resultados com ferramentas de geometria definida que MQL pode ser usado prosperamente nos processos de retificação. Contudo, extensivos estudos são necessários antes que esta tecnologia seja aplicada industrialmente, principalmente no que se refere ao lubrificante empregado. Neste contexto, pesquisas são necessárias no intuito de verificar os benefícios e danos causados por tal processo, viabilizando assim seu uso em escala industrial. Estas pesquisas incluem otimização da composição do lubrificante junto com modificações nas retificadoras, nas ferramentas abrasivas e estratégias de monitoramento, para adaptá-las a diferentes condições de mínima quantidade de lubrificação.

De acordo com Heisel et al. (1998), a técnica de MQL é um elo de ligação entre a usinagem a seco e a lubri-refrigeração convencional. Na aplicação convencional do fluido de corte há uma inundação intensa da superfície usinada e da peça, enquanto que nos sistemas em que se empregam a MQL o fluido é colocado em contato apenas com a área de corte definida entre ferramenta-peça-cavaco.

Por outro lado, muitos problemas relacionados com a lubri-refrigeração convencional podem ser eliminados como os custos do armazenamento excessivo e da eliminação de emulsões danosas ao meio ambiente (Novaski & Dörr, 1999).

Segundo Klocke et al. (2000), do ponto de vista ecológico, a utilização da técnica de MQL no processo de retificação é desejável. Porém, a retificação a seco tem sido uma exceção em lugar da regra em relação aos outros processos de usinagem. As razões concentram-se na grande quantidade de calor introduzido no processo como resultado do atrito entre o grão abrasivo e a peça e também da grande quantidade arestas de corte em ação. Este fator aumenta o risco de danos térmicos na superfície da peça. O calor introduzido na peça no processo de retificação é superior quando comparado com as operações de usinagem com geometria definida. Por outro lado, a geometria do grão abrasivo geralmente apresenta ângulo de cisalhamento negativo requerendo maior força de atrito na interação, dificultando ainda mais o emprego de MQL na retificação.

De acordo com Tawakoli (2003), para se tornar o sistema de MQL habilitado no processo de retificação, são necessários desenvolvimentos nos seguintes sistemas e trabalhos de pesquisa:

- ✓ otimização dos processos de retificação;
- ✓ desenvolvimento de sistemas eficientes para remoção de cavacos;
- ✓ sistemas otimizados para fornecimento de fluidos de corte em pequenas quantidades;
- ✓ os parâmetros de usinagem devem ser baseados no completo entendimento da tecnologia de MQL para que a espessura de cavaco alcance valor ótimo;
- ✓ os componentes de atrito devem ser reduzidos e uso de ferramentas devem ser otimizadas.

A norma ISO série 14000 tem sido adotada por organizações de diversos países como base para seu sistema de gestão ambiental. Com o Brasil não foi diferente. Vem crescendo no País o número de empresas com certificados ISO série 14000, demonstrando uma tendência positiva à adoção desse tipo de sistema de gestão.

Os resultados obtidos por diversos pesquisadores até o presente momento, utilizando a tecnologia de MQL com ferramentas de geometria definida, mostram que a técnica de MQL pode ser aplicada com vantagens em muitos casos, contribuindo para uma manufatura limpa sem agressão ao meio ambiente e a saúde do pessoal de chão de fábrica. Os pesquisadores demonstram que os sistemas de MQL resultam em vida mais longa para a ferramenta, melhor

qualidade de acabamento superficial, menor dano à integridade superficial da peça e possibilitam velocidades de corte mais altas. A tecnologia de MQL está perfeitamente apta para os processos de fabricação, porém, é indispensável esforços conjuntos entre usuários, fabricantes de ferramentas e de máquinas para obtenção de resultados mais otimistas. Deve-se lembrar, no entanto, que apesar de todos resultados otimistas com ferramentas de geometria definida, no que se refere ao processo de retificação, a técnica de MQL está longe de ser implementada (Klocke & Eisenblätter, 1997; Heisel et al., 1998; Dörr, 1999; Kilcke et al., 2000; Silva, 2002 e Tawakoli, 2003).

4.3.1.5.1. Classificação e Projeto de Sistemas com Mínima Quantidade de Lubrificante

Como afirmam Brockhoff & Walter (1998); Heisel et al. (1998) Klocke et al. (2000) existem três tipos diferentes de sistemas de mínima quantidade de lubrificação. De um lado estão os sistemas de pulverização de baixa pressão, onde o refrigerante é aspirado por uma corrente de ar e levado à superfície ativa com uma mistura. Esses sistemas se distinguem por um fluxo volumétrico de refrigerante de aproximadamente 0,5 a 10 l/h. Eles são usados principalmente para a refrigeração com emulsões, produzem uma otimização notável e somente podem ser dosados grosseiramente. O segundo tipo de sistema usa bombas dosadoras com alimentação pulsatória de uma quantidade definida de lubrificante para a superfície ativa, sem ar. As taxas de fluxos são ajustáveis numa faixa entre 0,1 e 1 ml por ciclo, com até 260 ciclos por minuto. Estes sistemas são utilizados principalmente em processos intermitentes. O terceiro e mais usado tipo de sistema de refrigeração de quantidade mínima é o de pressão, em que o refrigerante é bombeado para o bocal através de uma tubulação de suprimento em separado, no bocal ocorre a mistura com ar comprimido fornecido separadamente, de forma que as quantidades de ar e lubrificante podem ser ajustadas independentemente. Este tipo de sistema é uma alternativa particularmente interessante, porque combina a funcionalidade da refrigeração com um consumo extremamente baixo, na faixa 10 a 100 ml/h. Ao mesmo tempo, a mistura coaxial de refrigerante e ar no bocal previne de forma eficiente a nebulosidade.

Heisel et al. (1998) apresentam um diagrama esquemático de um sistema de mínima quantidade de lubrificação com o princípio de pressão descrito e os seus componentes ilustrados na Figura 4.3. O *know-how* desta tecnologia consiste na otimização do projeto do bocal.

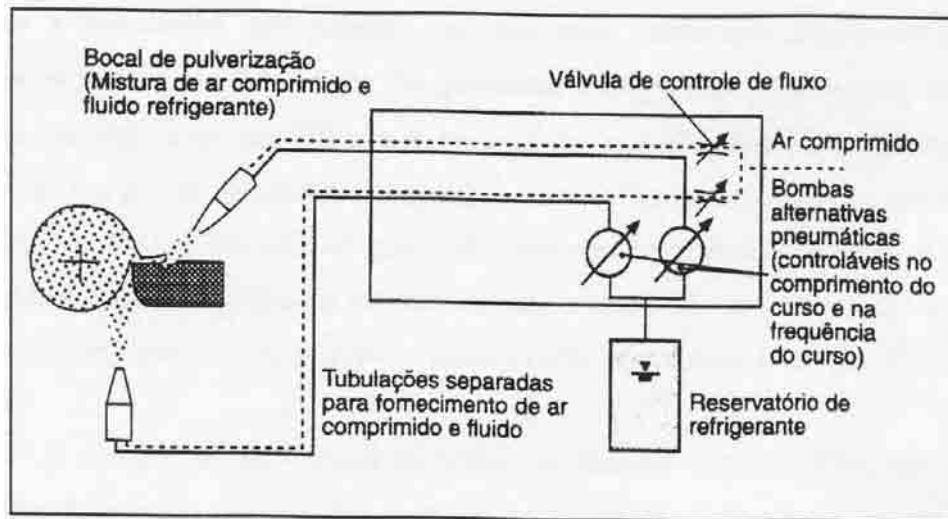


Figura 4.3 - Diagrama Esquemático de um Sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação (Heisel et al., 1998).

Os sistemas de mínima quantidade de lubrificação requerem espaço muito pequeno para sua instalação nas máquinas, podendo-se assim escolher diversas posições para a sua fixação. Estes sistemas são facilmente integrados com as máquinas, possibilitando instalar válvulas de controle para uma melhor integração. Estas vantagens fazem da MQL um sistema flexível para aplicações na retificação e em outros processos de corte (Heisel et al., 1998 e Klocke et al., 2000).

A estabilidade do jato, que significa a convergência da mistura ar-fluido, é muito importante para a aplicação prática nas máquinas de produção, porque ela determina a distância até a superfície ativa e, portanto, o perigo de colisões entre os sistemas de refrigeração e ferramentas, máquinas ou peça. Segundo Heisel et al. (1998), a distância entre o bocal e a área de corte, ângulo de pulverização ou ajuste relativo à interfaces parecem ser parâmetros de menor importância. Isto torna mais fácil o uso da mínima quantidade de lubrificação nas máquinas de produção.

A formação da névoa de óleo é causada principalmente pela função dos sistemas de MQL. Eles usam a mistura ar-líquido gerada para a lubri-refrigeração. Todos os óleos utilizados nos sistemas de MQL têm baixa vaporização. Desta forma, as partículas da névoa de óleo são parcialmente projetadas na interface peça-ferramenta, não proporcionando grandes dispersões da névoa. Os danos ao organismo humano somente podem ser causados pelas partículas que são capazes de entrar e permanecer nos pulmões (as chamadas “partículas respiráveis”), cujo diâmetro varia entre 0,5 e 5 μm . Somente partes da névoa e da fumaça de

óleo pertencem ao grupo de partículas respiráveis, havendo quem as considere como relativamente não prejudiciais, porque não há registro de danos ao sistema respiratório, mesmo que as concentrações sejam mais altas (Heisel et al., 1998).

A função de um sistema de MQL, no entanto, é baseada exatamente na geração de tal névoa. Em relação ao efeito danoso da utilização do sistema de MQL, existem apenas fatos insuficientes disponíveis. Todavia, como o potencial de riscos à saúde do trabalhador é preocupante, torna-se necessário realizar pesquisas mais aprofundadas nesta área (Heisel et al, 1998). Cabe ressaltar que o projeto do bocal, o equipamento de MQL e o lubrificante utilizado permitiram uma excelente formação de névoa sem dispersão da região de corte. O lubrificante empregado nos experimentos apresentou excelente lubricidade contribuindo para a diminuição do atrito na interface resultando positivamente em diversos parâmetros avaliados.

4.3.1.6 Influência da ferramenta e do fluido de corte nas trocas térmicas

A maioria dos danos observados no processo de retificação são de origem térmica. Dentre as várias técnicas utilizadas na determinação das temperaturas envolvidas na região de corte (Ueda et al., 1993; Ueda et al., 1995), somente com a utilização de termopares “embutidos” nas peças a serem retificadas foi possível obter-se indicações satisfatórias das temperaturas nas proximidades da região de corte, as quais podem ser efetivamente correlacionadas com os danos térmicos (Kohli et al., 1995).

As temperaturas geradas durante o processo de retificação são consequência direta da energia introduzida no corte. Os métodos de medição de temperatura não permitem identificar e controlar, de forma prática, as variações de temperatura, sendo estes métodos restritos a testes laboratoriais, os quais não podem ser diretamente aplicados dentro de um processo produtivo de larga escala. Deve-se então adotar métodos indiretos de controle da temperatura e do dano térmico induzido à peça através do monitoramento dos esforços de corte, da rugosidade superficial, da tensão residual. Além disso, torna-se necessário o conhecimento teórico de como cada variável envolvida no processo de retificação afeta a geração e a dissipação do calor produzido, permitindo a otimização do processo. Esta deve englobar todos os componentes do processo, ou seja, a peça, a ferramenta, o fluido de corte e as condições de usinagem.

Segundo Malkin (1985), os danos térmicos gerados quando da retificação com rebolos superabrasivos de CBN são, geralmente, inferiores aos que ocorrem quando da retificação com rebolos convencionais. Utilizando-se rebolos de CBN, a queima da peça

raramente ocorre e as tensões residuais são, predominantemente de compressão (Tönshoff & Grabner, 1984 apud Malkin, 1989; Vansevenat, 1989). Isto indica que menores temperaturas de retificação são geradas na região de corte. Estas, segundo Kohli et al. (1995), são atribuídas, parcialmente, à menor energia gasta para a retificação com rebolos de CBN, devido à maior dureza de seus grãos (dureza Knoop do grão de CBN é de 4.500 e do grão de Al_2O_3 é de 2.500 kg/mm^2). Isto mantém a capacidade de corte do rebolo durante tempos maiores, diminuindo o desgaste dos mesmos, reduzindo as parcelas de energia relativas ao *plowing* (u_{pl}) e ao deslizamento de grãos cegos (u_{sl}).

Os menores valores de temperaturas geradas na retificação com rebolos de CBN são também alcançados devido à maior condutividade térmica de seus grãos abrasivos, quando comparadas com os de óxido de alumínio (condutividade térmica do grão de CBN é de 1.300 W(mk)^{-1} e do grão de Al_2O_3 é de 29 W(mk)^{-1}). Sendo assim uma fração muito maior do calor gerado é transportado para fora da zona de retificação pela ferramenta abrasiva, ao invés do mesmo fluir pela peça. (Lavine et al., 1989).

Comprovando o melhor desempenho dos rebolos de CBN, estudos realizados por Kohli et al. (1995) permitiram determinar a partição da energia gerada quando da realização de operações de retificação com rebolos de Al_2O_3 e CBN. Utilizando-se a técnica dos termopares embutidos, onde as temperaturas medidas foram comparadas com aquelas obtidas pelas formulações teóricas propostas por MALKIN (1989), observou-se que entre 60 a 75% da energia gerada durante o processo de retificação é transportada na forma de calor para a peça, quando da utilização de rebolos convencionais de óxido de alumínio. Para rebolos superabrasivos de CBN, os valores observados foram em torno de 20%. A menor partição de energia, quando da utilização de rebolos de CBN permite uma diminuição das temperaturas na região de corte e uma menor tendência de indução de danos térmicos à peça.

Os modelamentos apresentados por Malkin (1989) negligenciam a influência do fluido de corte nas temperaturas ocorridas na zona de retificação. A peça foi modelada como sendo um sólido adiabático de comprimento semi-infinito, com superfície perfeitamente isolada, exceto na região de localização da banda de calor. A maioria das operações de retificação são realizadas com a utilização de fluidos de corte, os quais lubrificam e refrigeram a peça. Conforme anteriormente mencionado, para que o fluido de corte resfrie efetivamente a região de corte, é necessário que o calor seja removido de dentro da mesma. Na maioria dos casos o fluido de corte, segundo Malkin (1989), não reduz significativamente as temperaturas na região de corte, devido à dificuldade de penetração destes na mesma região. Este baixo desempenho deve-se ao pequeno comprimento de contato e, muitas vezes,

à barreira hidrodinâmica gerada pelo rebolo dotado de velocidade V_s , sendo que o fluido deve apresentar velocidade de saída do jato igual à velocidade de corte do rebolo, para conseguir atingir a região de corte (Webster, 1995). O pequeno percentual de fluido de corte que atinge a região de corte, o qual é função da estrutura do rebolo e da forma de aplicação (Guo & Malkin, 1992; Engineer et al., 1992; Krishnan et al., 1995), tem papel ineficiente na refrigeração por convecção da região de corte, devido à ocorrência do efeito de evaporação do filme de fluido de corte (Lavine & Malkin, 1989). À medida que a temperatura crítica de evaporação do filme de lubrificante é atingida, ocorre um aumento abrupto da temperatura e dos esforços de corte (Shafto et al., 1975; Lavine & Malkin, 1989; Guo & Malkin, 1994).

Os fluidos de corte diminuem as temperaturas na região de corte de forma indireta, através de suas propriedades lubrificantes, diminuindo o atrito e, conseqüentemente, o desgaste do topo dos grãos abrasivos, gerando menos calor, devido à diminuição da energia despendida no deslizamento e no *plowing*.

4.4. Variáveis de saída envolvidas no processo de retificação

4.4.1. Força tangencial de corte (F_t) e energia específica (u)

De acordo com Malkin (1989) durante o processo de retificação existem forças atuantes na interface peça-rebolo. Para operações de retificação plana de mergulho (Figura 4.4(a)) e retificação cilíndrica externa de mergulho (Figura 4.4 (b)) o vetor resultante da força total de retificação exercida pela peça sobre o rebolo pode ser decomposto em uma componente de força tangencial (F_t) e uma componente de força normal (F_n).

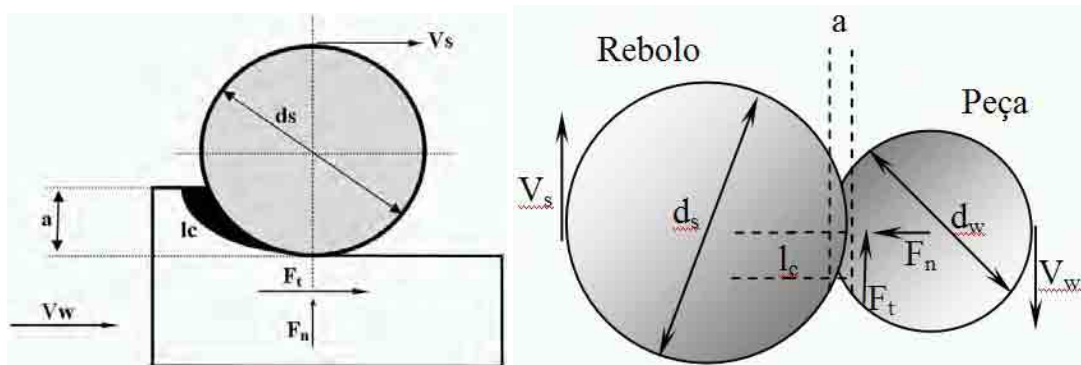


Figura 4.4 - Ilustração das componentes de força para retificação de mergulho (a) retificação plana, (b) retificação cilíndrica

Durante o processo de retificação, os grãos abrasivos se desgastam, os topos dos mesmos começam a perder suas “cristas”, ou seja, seu grau de afiação, tornando os grãos “cegos”. Devido à perda da afiação dos grãos ocorre um aumento nos esforços de remoção do material, originando deformações na superfície do material ao invés de sua efetiva remoção. Com o aumento destes esforços e das deformações citadas ocorre o aumento da força tangencial de corte, em consequência de maiores atritos do topo do grão abrasivo com a superfície do material gerando elevadas temperaturas e calor envolvidos no processo.

Assim, com a elevação da força de corte tangencial há, conseqüentemente, a elevação da temperatura, com possibilidades de danos térmicos, podendo afetar também a rugosidade superficial final da mesma. Isto é confirmado por Schwarz (1999), afirmando que quando um rebolo está gasto, sua tendência é produzir um acabamento mais liso ocorrendo, porém, um aumento na probabilidade do aparecimento de danos térmicos, formação de lóbulos e trepidação. Esta variável permite também analisar o desempenho das ferramentas abrasivas, detectar a ocorrência de macro e micro-desgaste, a capacidade de fixação dos grãos abrasivos pelo ligante, a elevação da temperatura na região de corte, o estado de tensão residual, dentre outras.

Segundo Malkin (1989), o processo de retificação requer uma quantidade significativa de energia para a remoção de material. Durante o processo, esta energia é transformada em calor, o qual é concentrado dentro da região de corte. As elevadas temperaturas podem produzir vários tipos de danos térmicos à peça, tais como: queima superficial, transformações microestruturais, aquecimento superficial possibilitando o aparecimento da têmpera superficial, re-têmpera do material (quando da usinagem de um aço temperado), com a formação de martensita não revenida, gerando tensões residuais de tração

indesejáveis e redução do limite de resistência à fadiga do componente usinado. Além disso, a expansão térmica da peça durante a retificação contribui para erros dimensionais e de forma no estado final da peça.

No processo de retificação são consumidas energias que variam entre 20 e 60 J/mm³, o que significa aproximadamente 10 vezes a energia que se consome no processo de torneamento. Esta energia é transformada em calor, o que ocasiona elevadas temperaturas (Weingaertner et al., 2001).

Segundo Marshall (1952) e Backer et al. (1952), os estudos das forças e energia específica de retificação (J/mm³), começaram no início dos anos 50 e mostraram que a energia específica envolvida era muito maior quando comparada àquela encontrada em outros processos de usinagem. Como em outros processos de corte de metais, uma tentativa foi feita visando interpretar as forças de retificação, em função dos mecanismos de formação do cavaco. Através de considerações pertinentes referentes à geometria típica dos grãos abrasivos, estimativas da tensão de cisalhamento foram efetuadas, devido à deformação plástica do material durante a formação do cavaco.

A energia específica (u_c) associada à retificação é uma variável de saída relacionada diretamente com a força tangencial de corte e a velocidade periférica da ferramenta, entretanto a mesma é afetada por outros parâmetros como pode ser verificado na equação 3.

$$u_c = \frac{F_t V_s}{\pi d_w V_f b} \quad (3)$$

Onde: V_s é a velocidade corte

b é a largura de retificação

V_f é a velocidade de avanço

d_w é o diâmetro da peça.

Apesar da remoção de material ocorrer principalmente por formação de cavaco, devido ao relatado nos itens anteriores, uma grande parte da energia de retificação deve ser despendida em outros mecanismos distintos à formação do cavaco.

4.4.2. Desgaste diametral do rebolo

O desgaste do rebolo pode ser expresso tanto pela sua perda diametral, bem como, através da redução volumétrica do mesmo, e pode ser classificado em três tipos: atrito, fratura do grão e fratura do ligante. Todos os tipos de desgaste ocorrem simultaneamente mas em intensidades diferentes.

Pode-se expressar o desgaste total em termos da relação G , que é a taxa volumétrica de material removido em contraposição ao desgaste do rebolo. Para operações típicas de retificação de precisão com rebolos convencionais (óxido de alumínio ou carboneto de silício) o custo do rebolo é geralmente insignificante, e mais rebolo pode ser consumido pela dressagem do que pelo processo de retificação em si. Em tais casos o menor desgaste do rebolo, com a maior relação G pode não ser a melhor situação, pois pode exigir maiores forças e energias e isso conduz a temperaturas excessivas (Malkin, 1989).

Segundo Malkin (1989), restrições de desgaste do rebolo são freqüentemente associadas à rugosidade superficial e tolerâncias necessárias. Com taxas de remoção mais rápidas, a relação G tende a decrescer, levando a uma mais rápida deterioração na forma e no acabamento da superfície. A utilização de um fluido de corte pode aumentar a relação G , diminuindo as forças e temperatura gerada no processo.

O desgaste total do rebolo aumenta com o tempo de corte. Ele pode ser dividido em uma diminuição de raio e em desgaste de quina do rebolo. Se o desgaste radial não é compensado durante a retificação por um sistema de medição adequado, pode-se ter um erro de medida ou eventualmente surgir vibrações na superfície da peça.

Têm-se assim dois mecanismos de desgaste:

- ✓ Cegamento do grão isolado por desgaste abrasivo mecânico, adesão, corrosão, difusão, bem como micro e microfissuras, em decorrência de tensões térmicas.
- ✓ Quebra de grãos integrais ou grupos de grãos por uma sollicitação mecânica demasiada do ligante ou em decorrência da deterioração térmica ou química do ligante.

A interligação destes dois mecanismos de desgaste caracteriza o comportamento de desgaste do rebolo. Um efeito de auto-afiação pode ser introduzido quando as arestas cegas são quebradas para fora do ligante em virtude da ação de uma força, permitindo assim o surgimento de novas arestas.

4.4.3. Integridade Superficial

4.4.3.1. Rugosidade

Segundo Carpinetti (2000) a rugosidade superficial caracteriza-se pelas micro-irregularidades geométricas da superfície do material usinado. A rugosidade consiste basicamente de marcas regulares oriundas do perfil da ferramenta combinada a outras irregularidades, podendo ser variáveis conforme o material e o tipo de ferramenta utilizada. As micro-irregularidades são em geral sobrepostas a outras irregularidades geométricas, com ordem de grandeza crescentes.

Pode-se quantificar a rugosidade de uma superfície usinada através de parâmetros relacionados à altura (amplitude) e largura (espaçamento) das irregularidades. Segundo Dagnal (1986) e Stout (1981) apud Carpinetti (2000) os parâmetros comumente utilizados são:

- ✓ Rugosidade média (R_a);
- ✓ Rugosidade média quadrática (R_q);
- ✓ Máxima distância entre pico a vale (R_t);
- ✓ Média das distâncias entre saliências (S_m).
- ✓ Fração de contato (t_p);
- ✓ Média da inclinação das irregularidades do perfil (Δa);
- ✓ Outros.

Existem diferentes métodos e instrumentos para a quantificação da rugosidade de superfícies, convencionalmente ela é obtida através de instrumentos eletrônicos como o rugosímetro, que possui um contato mecânico, através do deslizamento de um apalpador com ponta de diamante sobre um comprimento de superfície estipulado, de acordo com as condições de usinagem.

A rugosidade em mecânica de precisão afeta várias propriedades físicas do material, como por exemplo:

- ✓ Atrito;
- ✓ Desgaste;
- ✓ Lubrificação em peças de deslizamento;
- ✓ Transmissão de calor;
- ✓ Resistência mecânica;
- ✓ Outros.

O controle da rugosidade nos processos de usinagem é realizada pelo gerenciamento e otimização dos processos e condições de usinagem.

O tipo de rebolo (CBN ou óxido de alumínio) pode também influenciar nos valores de rugosidade, pois rebolos de CBN apresentam um maior poder de corte ao longo do processo, resistindo mais ao desgaste abrasivo, se comparado ao rebolo convencional. Já para o rebolo convencional de óxido de alumínio tal comportamento se difere, pois os rebolos de óxido de alumínio não apresentam a característica de auto-afiação (no caso de elevada dureza utilizada na retificação de precisão), gerando, portanto grãos cegos com maior frequência e conseqüentemente elevando os valores da força tangencial de corte e temperatura, que facilitam o entupimento das porosidades do rebolo gerando maiores valores de rugosidade.

4.4.3.2. Circularidade

4.4.3.2.1. Tolerância geométrica de forma

Apesar do alto nível de desenvolvimento tecnológico, ainda é impossível obter superfícies perfeitamente exatas. Por isso, sempre se mantém um limite de tolerância nas medições. Mesmo assim, é comum aparecerem peças com superfícies fora dos limites de tolerância, devido ao processo de usinagem, nesse caso a peça apresenta erros de forma.

Um erro de forma corresponde à diferença entre a superfície real da peça e a forma geométrica teórica. A forma de um elemento será correta quando cada um dos seus pontos for igual ou inferior ao valor da tolerância dada. A diferença de forma deve ser medida perpendicularmente à forma geométrica teórica, tomando-se cuidado para que a peça esteja apoiada corretamente no dispositivo de inspeção, para não se obter um falso valor.

Os erros de forma são ocasionados por vibrações, imperfeições na geometria da máquina, defeito nos mancais e nas árvores, etc. Tais erros podem ser detectados e medidos com instrumentos convencionais e de verificação, tais como réguas, micrômetros, comparadores ou aparelhos específicos para quantificar esses desvios como o circularímetro.

4.4.3.2.2. Definição de circularidade

A tolerância de circularidade é determinada por duas circunferências que têm o mesmo centro e raios diferentes. O centro dessas circunferências é um ponto situado no eixo da peça.

O campo de tolerância de circularidade corresponde ao espaço “t” entre as duas circunferências, dentro do qual deve estar compreendido o contorno de cada seção da peça.

Normalmente, não será necessário especificar tolerâncias de circularidade pois, se os erros de forma estiverem dentro das tolerâncias dimensionais, eles serão suficientemente pequenos para se obter a montagem e o funcionamento adequados da peça.

Entretanto, há casos em que os erros permissíveis, devido a razões funcionais, são tão pequenos que a tolerância apenas dimensional não atenderia à garantia funcional.

Se isso ocorrer, será necessário especificar tolerâncias de circularidade. É o caso típico de cilindros dos motores de combustão interna, nos quais a tolerância dimensional pode ser aberta (H_{11}), porém a tolerância de circularidade tem de ser estreita, para evitar vazamentos.

De acordo com Malkin (1989) e Demeter & Hockenberger (1997), o calor gerado na retificação tem sua maior intensidade no contato peça rebolo, penetrando em direção ao centro da mesma. Com isso, quanto maior a dificuldade do fluido adentrar na região de corte, maior será o calor presente na peça, facilitando assim a formação de dilatações e deformação térmicas, que acarretam em erros de circularidade, os quais são proporcionais à vibração da máquina e aos parâmetros de corte utilizados.

Segundo Minke (1999), os elevados atritos gerados durante o processo de retificação (principalmente entre a peça e o rebolo), podem ser considerados um fator de extrema importância para o aparecimento dos erros de circularidade, sendo que para a redução destes atritos, um fluido com boa capacidade lubrificante, além da refrigerante é recomendável, a fim de se melhorar a qualidade final da peça retificada.

4.4.3.2.3 A influência dos componentes mecânicos nas máquinas-ferramentas na formação dos erros de circularidade

Os componentes das máquinas retificadoras são fabricados por outras máquinas-ferramenta (tornos, fresas, furadeiras, retificadoras entre outras), que também produzem peças com erros de circularidade. Com essa produção, constroem-se novas máquinas-ferramenta

que, em geral, são compostas por uma placa ou castanha com três pontas, colunas, fusos, vários elementos de deslizamento e ferramentas estáticas ou rotativas.

A precisão da peça a ser obtida em uma máquina-ferramenta é influenciada por divergências do movimento entre a ferramenta e a peça, por dilatação térmica em seus elementos de máquinas. Essas dilatações térmicas produzem uma distorção térmica que levam a um deslocamento relativo entre a peça e a ferramenta cortante, gerando assim uma influência na precisão da peça que está sendo submetida à operação de retificação. Porém, durante os testes de aceitação da máquina, é raro verificar-se o comportamento térmico da mesma, a ser observado separadamente como uma fonte de introdução de calor ao meio em que está a máquina-ferramenta. O efeito da temperatura, na mudança da forma da máquina e seus componentes, podem ser verificados medindo-se o comportamento dos erros de circularidade.

O perfil final da peça é também afetado pelo perfil inicial dela, pelo mal alinhamento do centro da peça cilíndrica e pelo erro de retidão desta (Park, Kim e Lee, 1997). Estes dados mostram como é complicado o processo de retificação. Especialmente, a retificação ao longo de eixos delgados, sem paralelismo na direção axial torna-se um processo delicado devido a deformação elástica dos componentes do rebolo.

4.4.3.3. 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, que permite a visualização da superfície de amostras volumosas.

Estes instrumentos obtiveram rapidamente grande aceitação devido à sua ampla gama de utilização e um mínimo de preparação das amostras.

Segundo Mannheimer (2002) 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 resulta em 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.

4.4.3.4. Danos térmicos na retificação

Segundo Malkin (1989), para a remoção de material o processo de retificação requer uma quantidade significativa de energia por unidade de volume de material removido. Virtualmente, toda esta energia é transformada em calor, o qual é concentrado dentro da região de corte. As elevadas temperaturas podem produzir vários tipos de danos térmicos à peça, tais como: transformações microestruturais, aquecimento superficial e subsuperficial da peça, gerando tensões residuais de tração indesejáveis, reduzindo o limite de resistência à fadiga do componente usinado. Além disso, a expansão térmica da peça durante a retificação contribui para erros dimensionais e de forma no componente usinado. As taxas de retificação hoje utilizadas são limitadas pelas temperaturas máximas permissíveis no processo de retificação, as quais, quando ultrapassadas, podem levar à deterioração da qualidade final da peça produzida.

Segundo Kohli et al. (1995), o calor gerado na zona de retificação é dissipado através da peça, do rebolo, do cavaco gerado e pelo fluido de corte, sendo que a partição de energia que flui por cada um desses elementos tem sido o objeto de estudo. De modo particular, tem-se estudado aquela que flui pela peça, pois o aumento de temperatura em sua superfície é decorrente de uma maior partição de energia para a mesma. Este aumento leva a uma maior incidência dos danos térmicos acima descritos.

O controle destes requer um conhecimento detalhado desta partição de energia e do controle da energia introduzida na peça pelo processo de retificação, através da otimização das condições de usinagem e da escolha correta do par fluido-ferramenta (Guo & Malkin, 1992).

Excessivas temperaturas geradas durante o processo de retificação podem causar danos térmicos às peças. O calor gerado no processo de retificação, função do mecanismo de remoção do cavaco, é resultado da transformação da energia mecânica envolvida no processo em energia térmica. Esta energia pode levar ao surgimento de uma camada de material afetada termicamente, dependendo das temperaturas envolvidas e da taxa de resfriamento imposta.

4.4.3.4.1. Microdureza

Segundo 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, 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 a terem sido atingidas 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, dependente da temperatura, do tempo de aquecimento e das velocidades de resfriamento impostas pelo fluido de corte.

Segundo Johnson (1986), 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 à 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 que aumenta a susceptibilidade da superfície do material à ataques por processos corrosivos.

4.4.3.4.2. Tensões residuais

O processo de retificação invariavelmente conduz a tensões residuais nas adjacências da superfície acabada, as quais podem afetar o comportamento mecânico do material. As tensões residuais são induzidas por deformações plásticas não-uniformes nas proximidades da superfície da peça. Interações mecânicas dos grão abrasivos com a peça resultam, predominantemente, em tensões residuais de compressão, resultado de deslocamentos plásticos localizados. Segundo Malkin (1989), as tensões residuais de tração são causadas, principalmente, por tensões induzidas termicamente e deformações associadas com as temperaturas de retificação e o seu gradiente da superfície ao interior da peça.

No processo produtivo, a maioria das tensões residuais de retificação são de tração, as quais indicam que as mesmas são, predominantemente, de origem térmica. Tensões residuais de compressão são consideradas benéficas para as propriedades mecânicas dos materiais, aumentando a sua resistência à fadiga, enquanto as tensões de tração são prejudiciais quanto à resistência mecânica, à corrosão e ao desgaste (abrasão à altas temperaturas).

Na zona de retificação, a expansão térmica da porção mais quente do material, aquela nas proximidades da superfície da peça é parcialmente reprimida pela porção mais fria de material, na subsuperfície da mesma. Isto gera tensões de compressão de origem térmica nas proximidades da superfície, as quais, se suficientemente grandes, podem causar escoamento plástico em compressão. Durante o resfriamento subsequente, após a passagem da fonte de calor da retificação, o material deformado plasticamente tende a contrair mais que o material da subsuperfície, mas os requisitos de continuidade do material causam o desenvolvimento de tensões de tração na superfície do material. A fim de garantir o equilíbrio mecânico do material, a tensão residual de compressão deve também surgir nas profundidades mais elevadas do material. Porém, as tensões residuais de compressão são, em ordem de magnitude, inferiores quando comparadas com as tensões residuais de tração. A formação de tensões termicamente induzidas é basicamente acompanhada por transformações de fases sólidas, as quais podem ocorrer durante o ciclo de aquecimento e resfriamento, pois estas resultam em variações volumétricas.

Alguns exemplos da distribuição da tensão residual ao longo da direção de retificação para um aço ligado são mostrados na Figura 4.5.

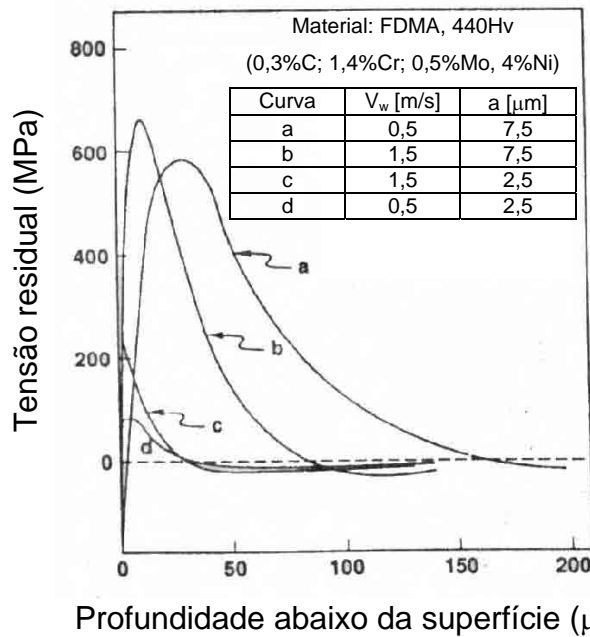


Figura 4.5 - Distribuição da tensão residual induzida pela retificação, as quais são consideradas induzidas termicamente (MALKIN, 1989)

As medições da tensão residual revelam um estado de tensões biaxial na camada superficial, com tensões ao longo da direção de retificação aproximadamente iguais às tensões transversais à direção de retificação.

A influência das tensões residuais são de extrema importância para materiais de alta e ultra-alta resistência, os quais aliam alta resistência, porém com certo grau de fragilidade (baixa tenacidade). Para estes materiais, as considerações de resistência mecânica e à fadiga são de extrema importância, pois as tensões residuais de tração podem levar a uma maior velocidade de propagação de trincas e conseqüente redução da vida do componente ou a sua falha por fadiga.

De modo geral, deseja-se controlar a indução ou a magnitude das tensões residuais através da adequação das condições usinagem. Entretanto a demanda de maiores taxas de remoção resultam em maiores tensões residuais de tração.

Segundo Brinksmeier (1986), as diferenças básicas entre os estados de tensão residual conferidos quando da utilização de rebolos de CBN e de Al_2O_3 , tem suas razões básicas nas propriedades físicas de seus abrasivos, sendo elas:

O grão de CBN é mais duro que o de Al_2O_3 , o que permite um menor desgaste do grão ao longo da vida, menores forças de retificação e menor geração de calor.

A condutividade térmica dos grãos de CBN é quarenta vezes maior que a do grão de Al_2O_3 , o que permite uma menor partição da energia gerada para a peça ($\varepsilon = 20\%$) (Kohli et al., 1995). Isto facilita o seu controle dimensional, permitindo assegurar a sua integridade superficial.

Após o perfilamento, os grãos de CBN apresentam uma superfície de estrutura fina, estas favorecem os mecanismos de formação do cavaco, aos invés do *plowing*. Os grãos de Al_2O_3 após a dressagem apresentam, frequentemente, grãos com arestas de corte achatadas, as quais levam ao aumento de suas áreas de corte e, conseqüentemente, do calor induzido por atrito (Brinksmeier, 1986).

Além dos grãos abrasivos, os rebolos também são constituídos de material ligante e porosidades para o alojamento dos cavacos. Geralmente, os rebolos convencionais são, predominantemente, confeccionados com ligantes cerâmicos, enquanto os rebolos de CBN podem apresentar ligantes específicos, dependendo dos requisitos operacionais. Devido as suas diferentes propriedades térmicas, estes ligantes podem influenciar os eventos térmicos que ocorrem na zona de retificação.

Os rebolos de CBN produzem, na maioria dos casos, tensões de compressão (Brinksmeier, 1982). Entretanto, os rebolos Al_2O_3 também estão aptos a gerar tensões residuais de compressão, mas somente logo após a dressagem. Com o aumento do volume de material removido, a tensão residual tende a ser de tração e de maior intensidade. De forma oposta, o rebolo de CBN é muito menos sensível à variações na quantidade de material removido, garantindo tensões residuais de compressão, mesmo após longos períodos de retificação (Brinksmeier, 1986).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental deste trabalho foi desenvolvida no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), do departamento de engenharia mecânica da Unesp/Bauru-SP. Neste capítulo são descritos todos os materiais e métodos utilizados na execução dos ensaios, possibilitando assim um maior detalhamento das condições e técnicas adotadas.

De uma forma geral esta pesquisa pretende comprovar a eficiência de uma nova técnica de aplicação do fluido de corte (MQL) em comparação com a técnica convencional, tendo como variáveis de saída diretas (durante a usinagem) a força tangencial de corte, energia específica e emissão acústica, e variáveis de saída indiretas (pós usinagem) a rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo, microscopia eletrônica de varredura, tensão residual e microdureza.

Para a realização dos ensaios utilizou-se uma retificadora cilíndrica modelo RUAP 515H do fabricante SULMECÂNICA equipada com um comando numérico CNC da Fagor.

5.1. Material dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados foram construídos com material aço ABNT 4340. Primeiramente foram torneados e posteriormente submetidos a têmpera e revenimento atingindo uma dureza média de 54 HRc, atingindo as dimensões definidas na Figura 5.1.

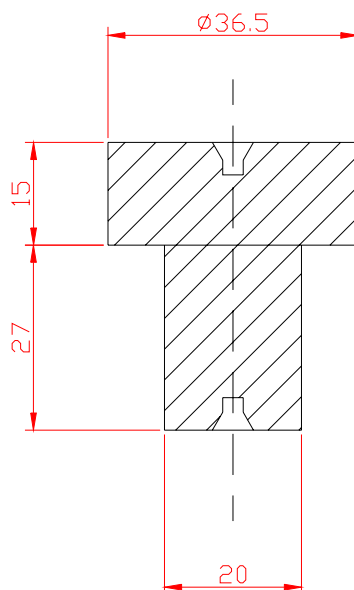


Figura 5.1 - Dimensões iniciais do corpo de prova

O aço ABNT 4340 é um material de grande aplicação, e se comporta bem quando submetido ao tratamento térmico de têmpera e revenimento ou de austêmpera. Pode ser alcançado profundo endurecimento (alta temperabilidade), sendo estes aços usados em produtos que necessitam alta resistência, e em peças grandes com boa tenacidade e ductilidade. Possui também boa resistência à fadiga e são muito utilizados 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 do aço ABNT 4340 fornecida pela *GERDAU Aços Finos Piratini* é demonstrada na Tabela 3:

Tabela 3 – 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

5.2. Tipos de ferramentas utilizados

Para os ensaios foram utilizados dois tipos de ferramentas: rebolo Superabrasivo de CBN (Master Diamond - B252P240V3) com ligante vitrificado e rebolo Convencional de Óxido de Alumínio (Al_2O_3) (Norton - 19A80SVSB), ambos os rebolos com diâmetro inicial de 350 mm e largura de 20 mm.

5.3. Lubri-refrigeração convencional

O fluido de corte utilizado para a lubri-refrigeração convencional foi o Agecool 939/B, uma emulsão sintética com concentração 5% e pH 7, indicadas pelo próprio fabricante. A concentração da emulsão foi verificada através do refratômetro portátil do fabricante *ATAGO* modelo N-1E e o pH através do peagômetro do fabricante Hanna. O controle de bactérias não foi necessário devido à rápida utilização do fluido de corte após a emulsão ter sido adicionada juntamente com a água no reservatório previamente limpo impedindo assim a contaminação do mesmo.

5.3.1. Bocal utilizado

O bocal utilizado para a lubri-refrigeração convencional foi o original da retificadora CNC, permitindo assim uma vazão máxima de 8,4 l/min, conforme a Figura 5.2. O dispositivo de fixação dos bocais permite a fixação de até 4 bocais simultaneamente, mas devido a largura da região da peça ser de apenas de 15mm, optou-se pela utilização de dois bocais para melhor direcionamento do jato do fluido de corte.

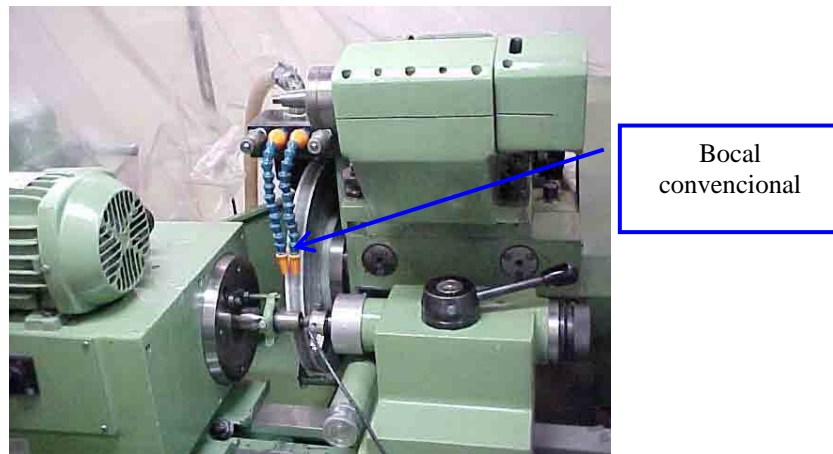


Figura 5.2 - Disposição de montagem do bocal para lubri-refrigeração convencional

A calibração da vazão foi realizada com o auxílio de um recipiente graduado de 45 litros, onde realizou-se três medições de vazões antes de se iniciar os ensaios de modo a se obter um valor médio. É importante ressaltar que não foi possível alcançar a relação unitária de velocidades, ou seja, velocidade de saída do fluido de corte igual a velocidade tangencial do rebolo, que foi mantida constante em 30 m/s, pois o objetivo do trabalho foi o de realizar uma comparação da MQL com a lubri-refrigeração convencional.

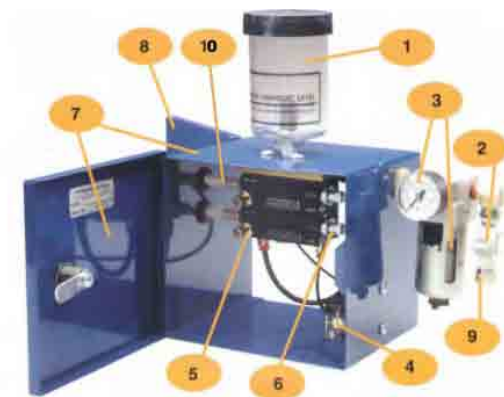
5.4. Mínima Quantidade de Refrigeração - MQL

O fluido de corte utilizado para a MQL foi o Accu-Lube LB 1000 do fabricante ITW Chemical Products Ltda, que é um óleo vegetal com aditivos de extrema pressão para operações severas, anti-oxidantes e biodegradável.

O equipamento para a aplicação do método da mínima quantidade de lubrificação é o ITW Accu-Lube 79053D de micro-lubrificação fornecida pela ITW Chemical Ltda conforme Figura 5.3 (a) e (b).



(a)



(b)

- 1 – Reservatório do fluido (300 ml);
- 2 – Registro de acionamento;
- 3 – Manômetro e filtro de ar;
- 4 – Gerador de frequência para emissão do fluido;
- 5 – Bomba pneumática para ajuste individual (duas saídas de ar comprimido);
- 6 – Ajuste do fluxo de fluido;
- 7 – Estrutura metálica;
- 8 – Base para fixação;
- 9 – Entrada de ar comprimido;
- 10 – Saída de ar comprimido e fluido (separadamente) para o bocal.

Figura 5.3 - (a) e (b) aplicador ITW Accu-lube 79053D

A utilização deste equipamento necessitou da montagem de uma linha de ar comprimido com filtros e reguladores de pressão abastecida por um compressor de ar conforme Figura 5.4.

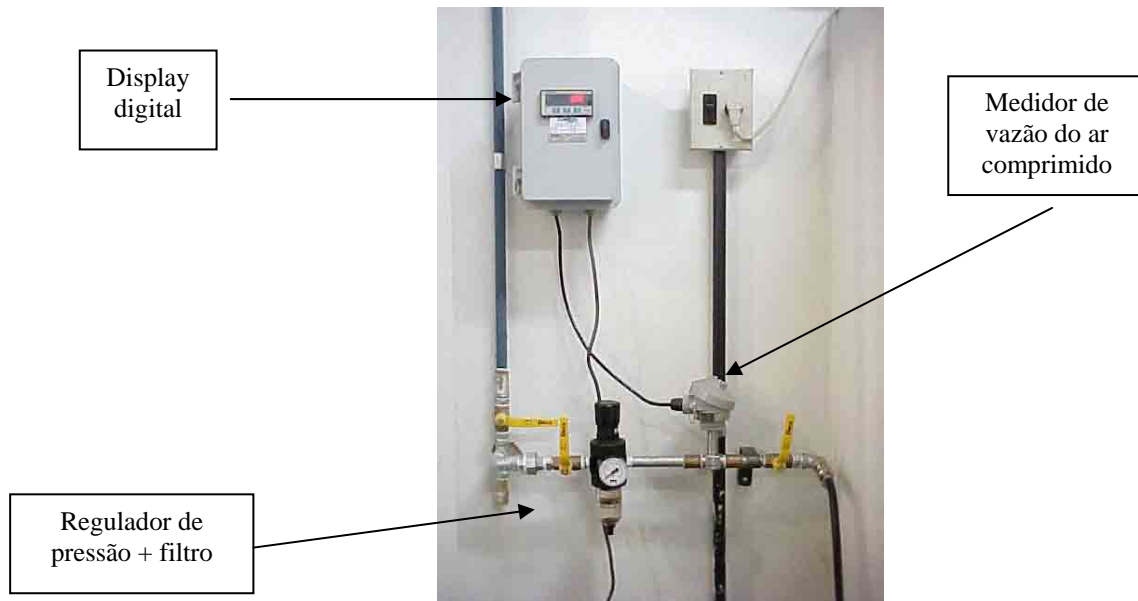


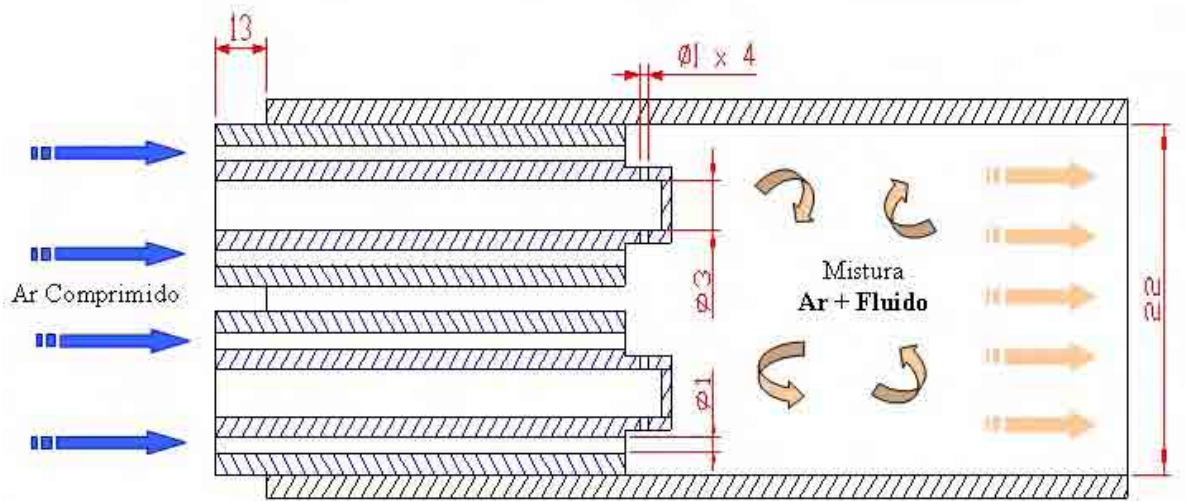
Figura 5.4 - Esquema de montagem da linha de ar comprimido

A pressão utilizada para o medidor de vazão foi de 8 kgf/cm^2 , recomendada pelo próprio fabricante, ajustada através do regulador de pressão e mantida constante para todas as condições de MQL.

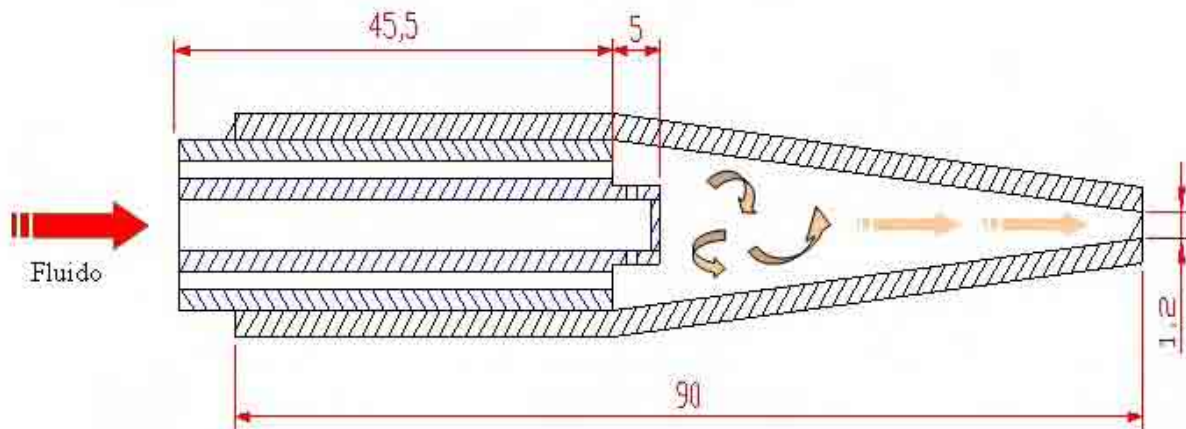
5.4.1. Bocal utilizado

O bocal utilizado foi confeccionado especialmente para melhorar a aplicação da MQL. Possuía duas entradas de ar conectadas, cada entrada estava conectada a uma mangueira de ar comprimido com uma mangueira interna, e uma câmara interna para uma correta mistura do ar comprimido com o fluido de corte, com uma saída retangular. O material utilizado para a sua confecção foi o latão.

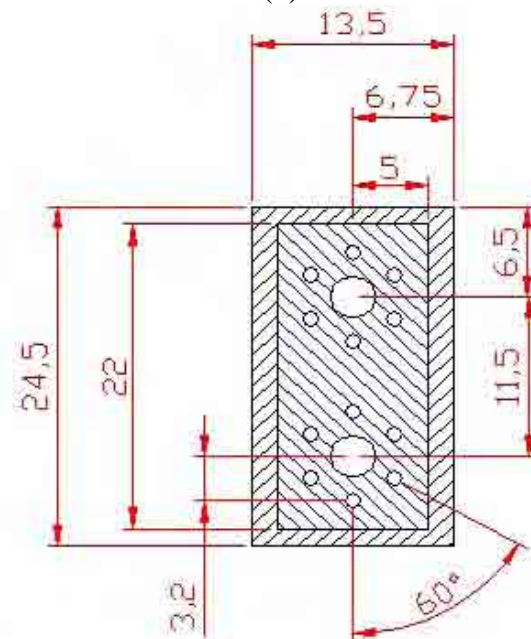
As dimensões do bocal estão mais bem definidas na Figura 5.5 (a), (b) e (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 5.5 - Bocal para MQL (a) vista superior do bocal, (b) vista lateral do bocal, (c) vista anterior do bocal

A Figura 5.6 mostra a montagem do bocal para a MQL.

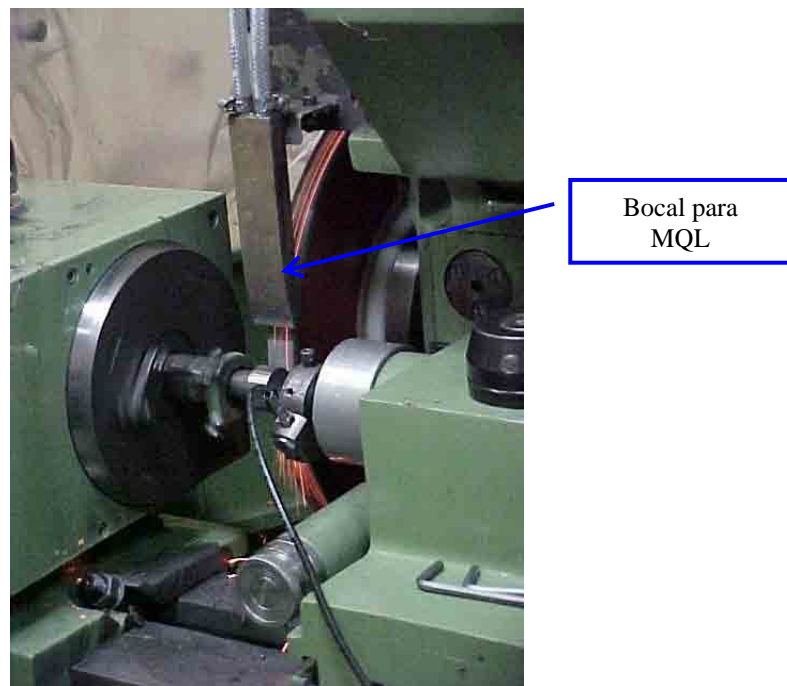


Figura 5.6 - Disposição da montagem do bocal para MQL

O bocal foi posicionado e mantido constante em todos os ensaios com a MQL a uma distância de 36 mm da interface peça-rebolo (menor distância da interface), e devido às inúmeras dressagens realizadas no rebolo com a MQL após cada ensaio, o bocal era sempre reposicionado de forma com que se mantivesse a distância correta.

As vazões de lubrificante após alguns ensaios preliminares foram de 40 e 60 ml/h e foram calibradas com o auxílio de uma proveta graduada. O equipamento utilizado permitia uma vazão de ar comprimido e fluido de corte separadamente, por meio de um registro conforme indicado na Figura 5.3 (b). Manteve-se uma pressão constante de $6,5 \text{ kgf/cm}^2$ na linha de ar comprimido. As velocidades do ar comprimido utilizadas foram de 20, 30 e 40 m/s.

5.5. Aquisição de Dados

A aquisição dos dados foi realizada através de um computador Pentium III 600 MHz, com placa de aquisição de dados A/D e software LabVIEW versão 6.1 do fabricante National Instruments. Os parâmetros coletados foram: potência elétrica (P_e) consumida pelo motor que acionava a ferramenta e a rotação da ferramenta (n).

As aquisições dos dados foram realizadas em tempo real e armazenadas através do software na forma de tensão [V] para posterior manipulação dos dados através de um software.

Os dados de rotação e potência elétrica consumida gerados durante o processo de retificação foram transmitidos à placa de aquisição de dados através de um circuito condicionador de sinais que possuía bornes de entradas para o recebimento dos dados. A montagem dos equipamentos para a aquisição dos dados é demonstrada na Figura 5.7.

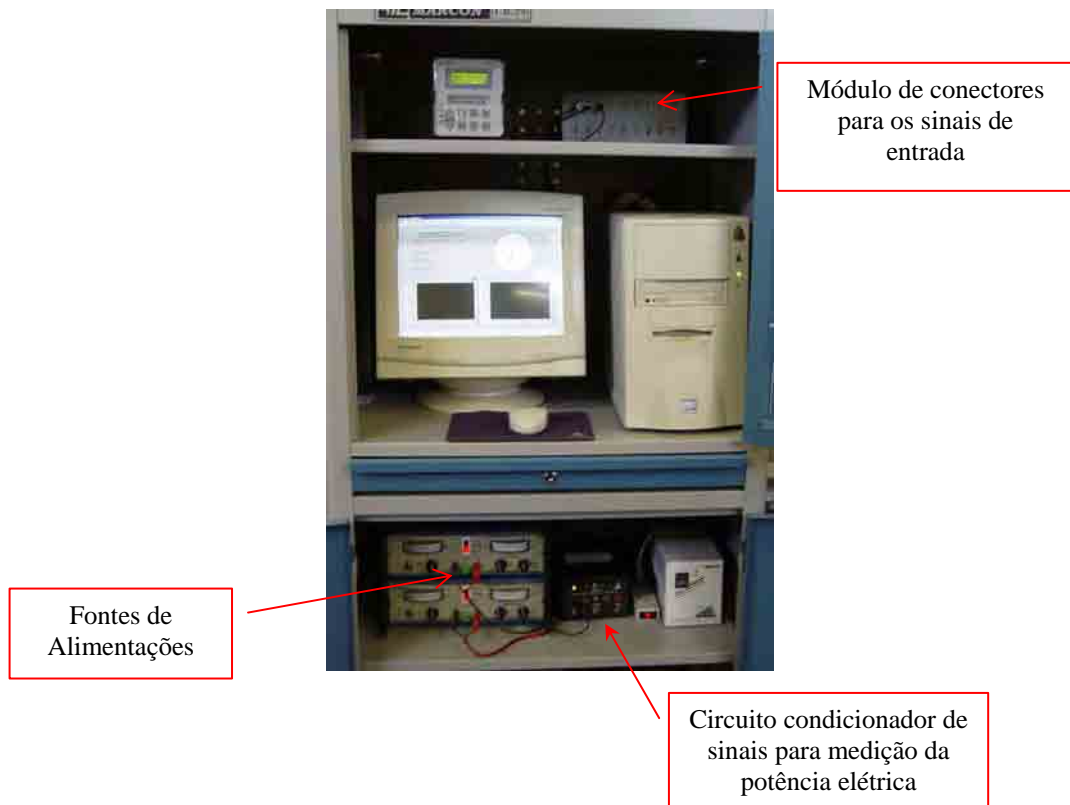


Figura 5.7 - Montagem dos equipamentos para aquisição dos dados

Para a manipulação e armazenamento dos dados desenvolveu-se um programa no LabVIEW que fornecia uma tela de apresentação para aquisição dos dados conforme Figura 5.8, com uma taxa de aquisição de 1000 pontos por segundo.

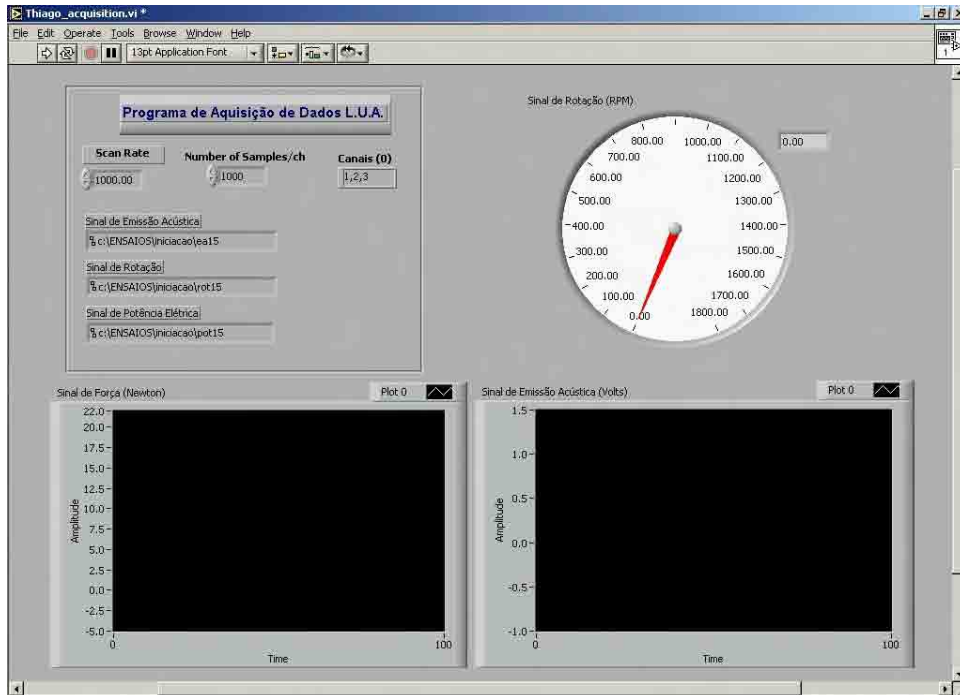


Figura 5.8 - Tela de apresentação do programa

Para manter-se a velocidade de corte constante e igual a 30 m/s compensou-se o desgaste do rebolo através da variação da rotação do rebolo por intermédio do inversor de frequência. A curva de calibração foi obtida por intermédio de três frequências (20, 40 e 60 Hz) indicadas no medidor de frequência e suas respectivas rotações. As rotações foram obtidas através de um tacômetro digital de forma manual.

5.5.1. Força Tangencial de Corte

A força tangencial de corte (F_t) foi obtida através da manipulação da potência elétrica (P_c) consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo, através da monitoração dos valores de tensão e corrente elétrica, provenientes deste motor elétrico. Para isso, um circuito eletrônico foi projetado e construído, sendo utilizado para transformação dos valores de corrente elétrica e tensão (provenientes do motor) em sinais de tensões compatíveis, para serem enviados a uma placa de aquisição de dados A/D e manipulados pelo programa de aquisição de dados, que foi desenvolvido, utilizando-se o LabVIEW 6.1, da National Instruments.

Convertendo tensão em rotação:

A calibração da rotação do rebolo foi obtida com auxílio de um tacômetro e um multímetro, variando os valores de frequência do inversor e realizando a leitura no tacômetro e no multímetro simultaneamente. Assim a curva de calibração para a rotação do rebolo foi obtida, conforme a Figura 5.9.

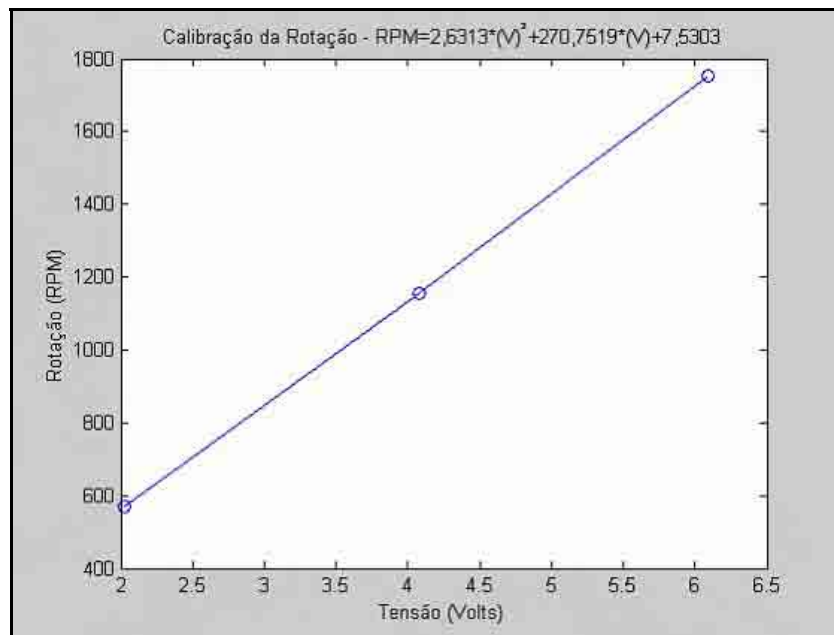


Figura 5.9 - Curva de calibração da rotação

Por regressão linear, obteve-se a equação (4).

$$RPM = 2,6313 * (V)^2 + 270,75198(V) + 7,5303 \quad (4)$$

Onde: *RPM* é a rotação do rebolo calibrado

V é a tensão consumida pelo motor da máquina retificadora [Volts]

Convertendo tensão em potência elétrica:

A potência elétrica foi obtida através do módulo de potência (curvopower) que fornece em forma de tensão [Volts] a potência consumida pelo motor da retificadora cilíndrica. A calibração do módulo foi realizada com o auxílio de lâmpadas incandescentes de

potência conhecida. Assim, energizando-se uma após a outra e medindo-se com um multímetro a tensão na saída do módulo foi construída a curva que é exibida na Figura 5.10.

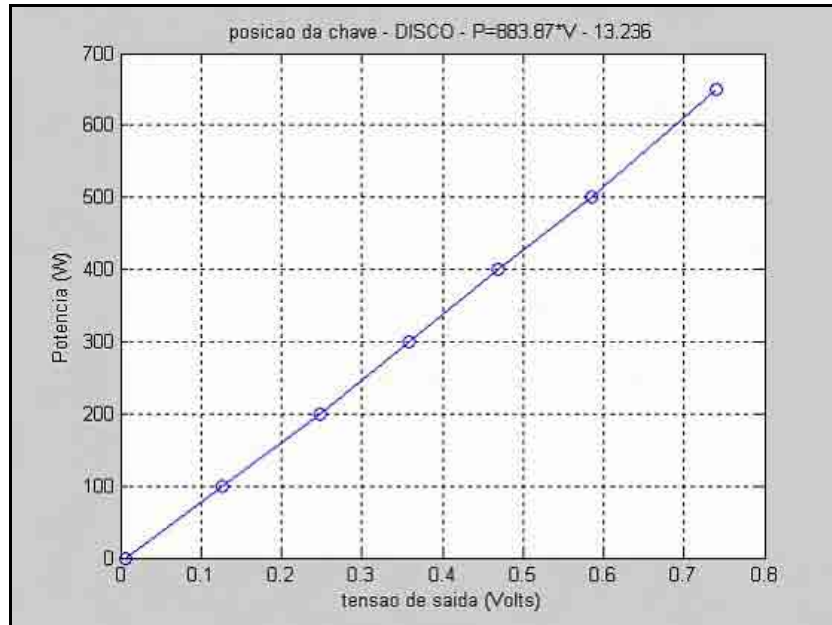


Figura 5.10 - Curva de calibração do módulo de potência (curvopower).

A curva de calibração do módulo de potência (curvopower) obtida é:

$$P_{elet} = 883,87 * V - 13,23 \quad (5)$$

onde: P_{elet} é a potência elétrica motor do rebolo [Watts];

V é a tensão na saída do módulo [Volts]

Convertendo potência elétrica em potência mecânica:

A partir de uma metodologia específica desenvolvida pelo grupo de pesquisa do laboratório de Usinagem por Abrasão, obteve-se a Equação (6), que relaciona a potência elétrica consumida pelo motor e a potência mecânica entregue no eixo do mesmo para acionar o rebolo.

$$P_{mec} = -2,3196e^{-008} * P_{elet}^3 + 1,6659e^{-004} * P_{elet}^2 + 5,3593e^{-001} * P_{elet} - 2,8961e^{001} \quad (6)$$

Após a obtenção da potência mecânica, calcula-se a força tangencial de corte pela equação:

$$F_t = \frac{60P_{mec}}{d_s n \pi} \quad (7)$$

Onde:

F_t é a força tangencial de corte [Newtons];

d_s é o diâmetro do rebolo [mm].

5.5.2. Energia Específica de Retificação

A obtenção da energia específica de retificação está relacionada diretamente com a força tangencial de corte, velocidade tangencial da ferramenta, diâmetro da peça, utilizando-se a Equação 4 fornecida por Malkin (1989).

$$u_c = \frac{F_t V_s}{\pi d_w b V_f} \quad [J/mm^3] \quad (8)$$

onde: F_t – força tangencial de corte [N];

V_s – Velocidade tangencial da ferramenta [m/s];

d_w – diâmetro da peça [mm];

b – largura da peça [mm];

V_f – velocidade de avanço [mm/min];

5.5.3. Medição do desgaste diametral do rebolo

O desgaste diametral do rebolo é um forte indicativo para avaliação entre diferentes condições de retificação, onde em todas as condições de usinagem removeu-se o mesmo volume de material. A marcação do desgaste do rebolo foi possível devido a não utilização da largura total do rebolo de 25 mm (pois a largura dos corpos de prova era de 15mm) criando-se assim um degrau no rebolo. Após a retificação do corpo de prova e marcação do desgaste em um outro corpo de prova (aço ABNT 1020), fixou-se o mesmo sobre um prisma em “V” de precisão sobre uma mesa de granito também de alta precisão localizada no laboratório de metrologia, executando-se três medições no degrau da superfície do corpo de prova através de um apalpador.

5.5.4. Circularidade

A circularidade foi obtida através da utilização de um circularímetro modelo Talyround 31C marca Taylor Hobson conforme Figura 5.11.

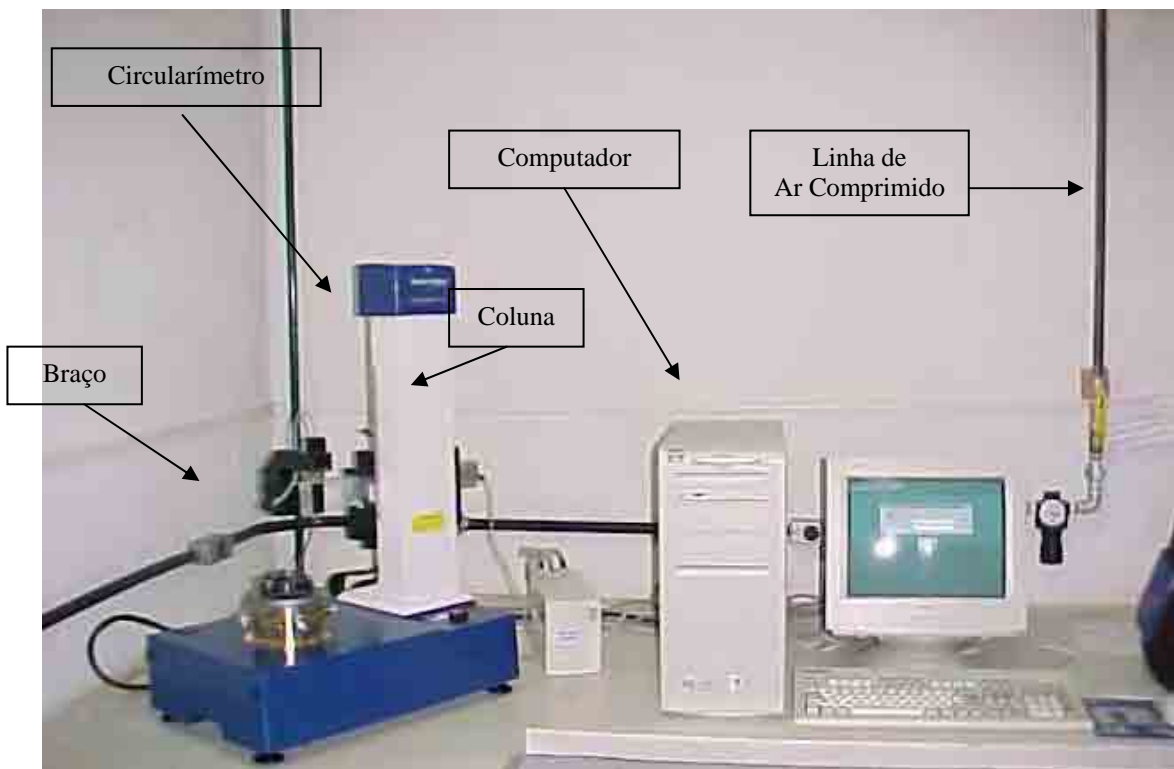


Figura 5.11 - Circularímetro e computador

O circularímetro possuía uma base com castanhas para a fixação das peças conforme Figura 5.12.

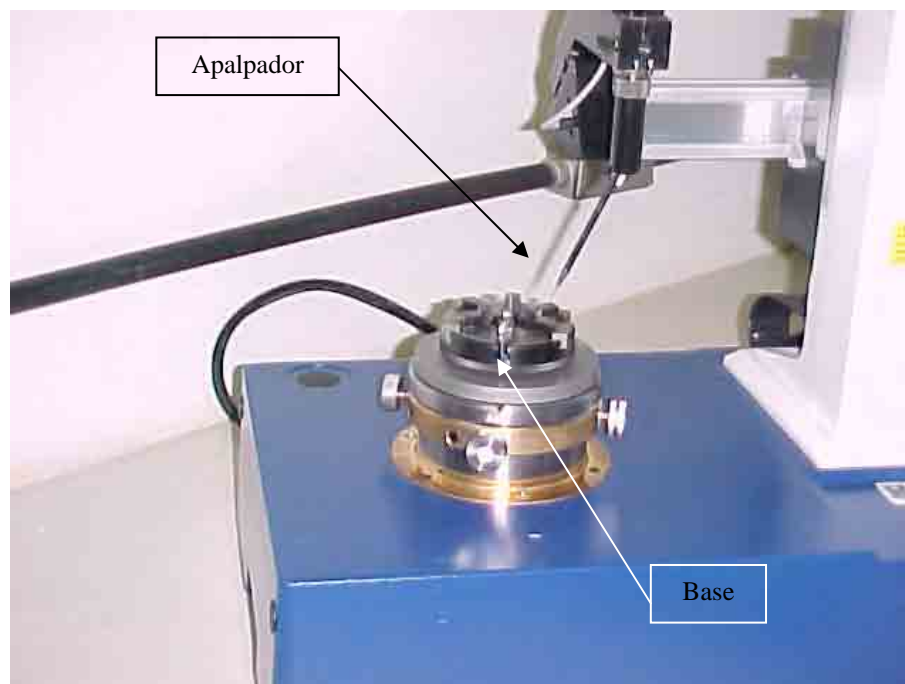


Figura 5.12 - Base acoplada à máquina

Na ponta do braço encontrava-se a parte mais sensível da máquina, o apalpador com uma ponta de diamante, elemento que efetuava o contato com a peça para a obtenção da circularidade.

O circularímetro foi alimentado através de um sistema de ar comprimido, garantindo assim que seus movimentos fossem extremamente precisos. A sequência do sistema utilizado foi um compressor de ar comprimido, um filtro logo após o compressor, de uma linha de pressão com tubulação de aço de 25,4 mm de diâmetro. Antes da entrada no circularímetro o ar comprimido percorria um registro geral, em regulador de pressão e um filtro.

Para cada peça foram realizadas três medidas em diferentes pontos da peça, distanciadas 5 mm entre uma medição e outra conforme Figura 5.13.

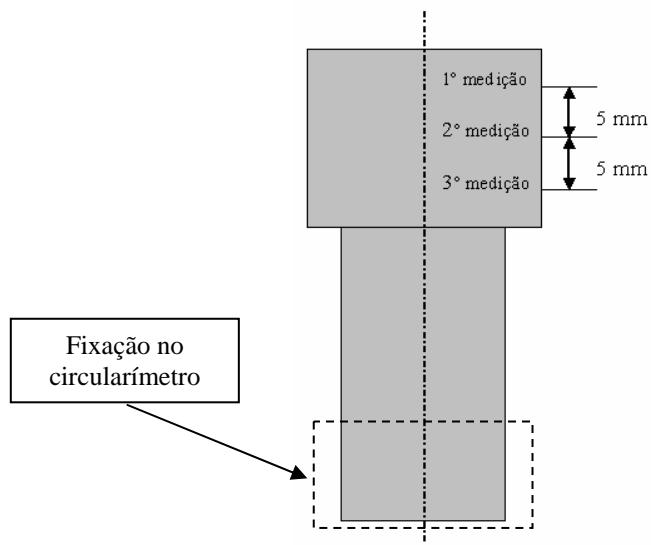


Figura 5.13 - Sequência das medições de circularidade

5.5.5. Rugosidade

O presente trabalho teve como objetivo, verificar o comportamento da rugosidade em função dos parâmetros de entrada, principalmente, do tipo e forma de aplicação de fluido de corte, tipo de rebolo e da geometria do bocal desenvolvido para a técnica da MQL.

A obtenção da rugosidade (R_a) foi através de um rugosímetro portátil modelo Subtronic 3+ da marca Taylor Hobson (Figura 5.14). O rugosímetro era ajustado para efetuar a medição com um $l_c = 0,8$ mm e $cut-off = 0,8$ mm e foi posicionado de uma forma que a medição fosse executada no sentido axial da peça.



Figura 5.14 - Rugosímetro

Realizaram-se 4 medições em posições distintas da peça conforme Figura 5.15.

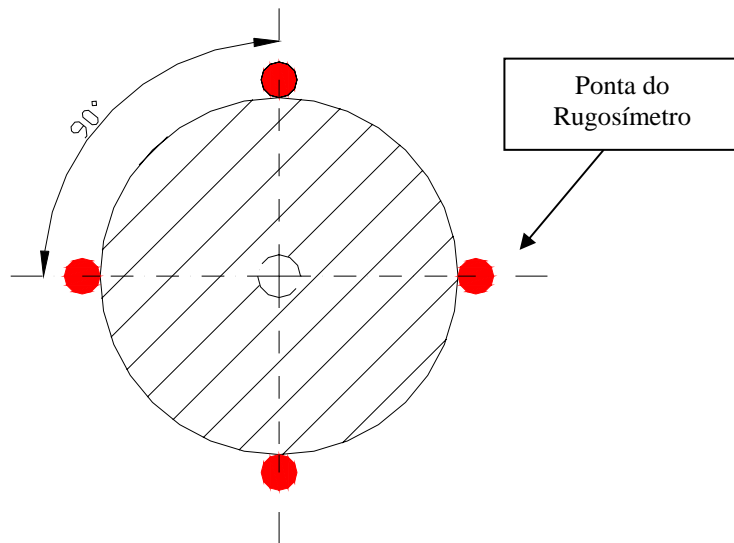


Figura 5.15 - Pontos de medição de circularidade

5.5.6. 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 divididos em três partes como mostra a Figura 5.16, através de uma policorte.

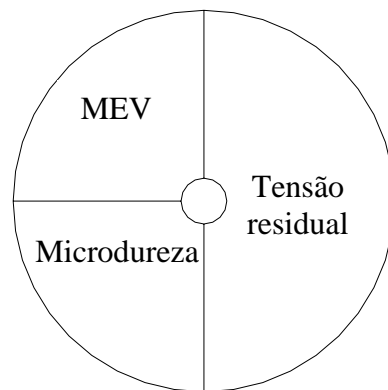


Figura 5.16 - Divisão da peça para análise.

Após terem sido cortadas as amostras foram embutidas.

A disposição do corpo de prova na resina para o MEV e a tensão residual seguiu o esquema conforme Figura 5.17:

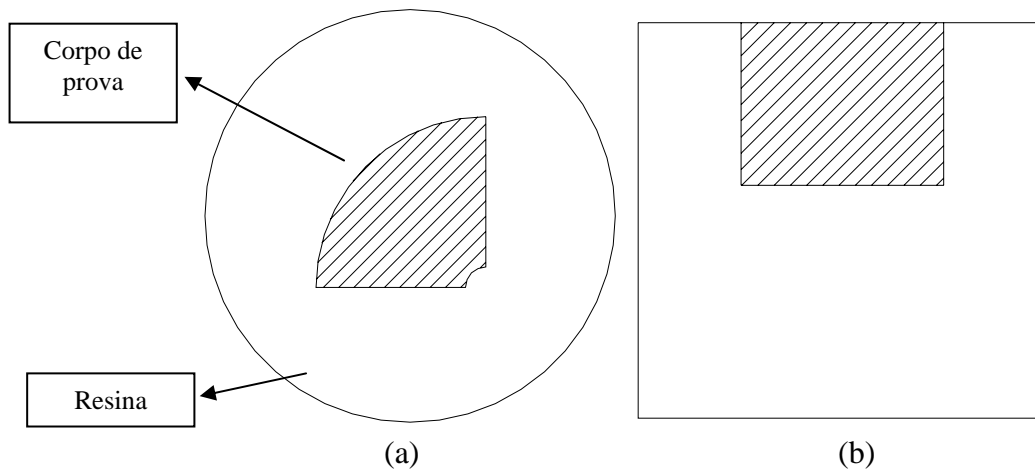


Figura 5.17 - Embutimento do corpo de prova para o MEV e tensão residual, (a) vista superior, (b) vista lateral

Após a completa solidificação da mistura, a amostra foi então lixada e posteriormente polida. Ao todo utilizou-se 7 lixas com as seguintes granulometrias: 120, 220, 320, 400, 600, 120 e 1500, e 3 polimentos com alumina de 1, 0,3, e 0,05 μm .

Para a realização do MEV as amostras sofreram um ataque químico com nital cuja concentração foi de 2% durante 8 segundos.

5.5.6.1. Microdureza

Para a realização da microdureza os corpos de prova foram embutidos de forma que o corpo de prova obtivesse uma posição conforme Figura 5.18.

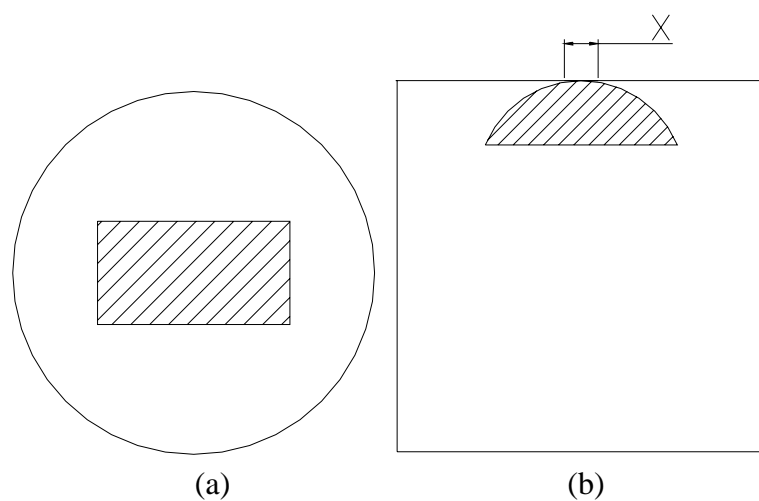


Figura 5.18 - Embutimento do corpo de prova para a microdureza, (a) vista superior, (b) vista lateral

Após o embutimento repetiu-se os mesmos lixamentos e polimentos realizados para o MEV e tensão residual, apenas o ataque químico não foi necessário. Os lixamentos foram realizados de forma que o comprimento X atingisse o valor aproximado de 4 mm, correspondente a uma profundidade abaixo da superfície de aproximadamente de 130 μm .

Pode-se verificar conforme Figura 5.19 a representação da região seccionada com algumas aplicações trigonométricas.

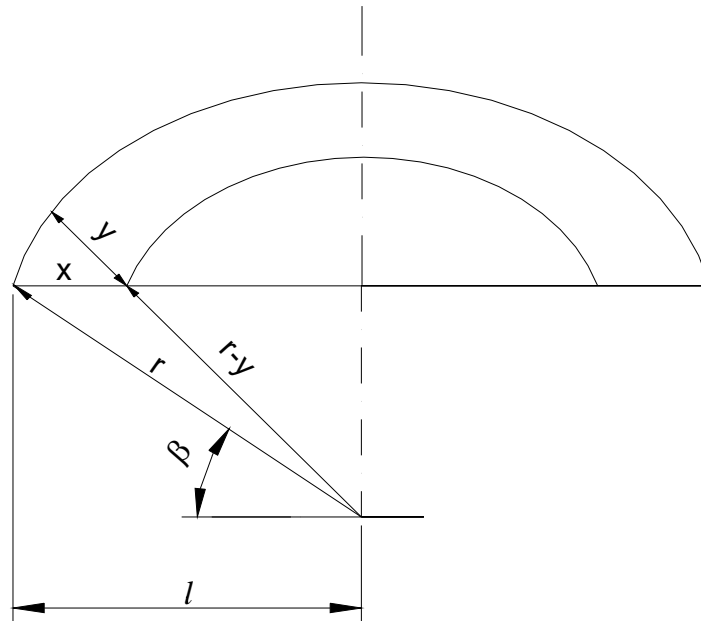


Figura 5.19 - Vista lateral da amostra (adaptado Silva, 2004)

Pela lei dos cossenos tem-se:

$$(r - y)^2 = r^2 + x^2 - 2rx \cos \beta$$

Como $\cos \beta = l/r$:

$$(r - y)^2 = r^2 + x^2 - 2xl$$

$$r^2 - 2ry + y^2 = r^2 + x^2 - 2xl$$

$$y^2 - 2ry + (2lx^2) = 0$$

$$y = r - \sqrt{r^2 - (2lx) - x^2} \quad (9)$$

onde x/y refere-se a taxa de ampliação da área observada.

Observando-se na Figura 5.19, onde o comprimento x será maior que o y , comprovando uma ampliação da área a ser observada, pois a razão entre x e y será maior que 1. As variações para o deslocamento x para cada medição foram de 30 a 300 μm , resultando em variações de profundidade y aproximadamente de 4 a 20 μm . Quando a profundidade abaixo da subsuperfície atingia aproximadamente 125 μm , utilizaram-se as amostras da análise de microestrutura para a complementação da medição até alcançar a profundidade de 300 μm , sendo que as medidas encontradas em nas duas amostras foram compatíveis.

Realizaram-se aplicações de cargas de 100, 200 e 300 g a fim de se definir a carga a ser aplicada nos ensaios de microdureza. A carga de 200 g proporcionou a melhor relação entre as medidas das diagonais, obedecendo-se à norma que estabelece uma distância mínima de duas vezes o valor da diagonal. Após a definição da carga realizou-se a aplicação da carga durante 40 s obtendo-se a microdureza.

5.5.6.2. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada no Centro de Caracterização de Materiais (CCDM) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

O objetivo para realização dos ensaios de MEV foi observar se houveram alterações micro-estruturais no material devido às diferentes condições utilizadas nos ensaios realizados.

Breve descrição do equipamento

Utilizou-se um Microscópio Eletrônico de Varredura Leica, modelo Stereoscan 440 (conforme Figura 5.20) e equipado com EDS (Espectroscopia por dispersão de energia de raios-X); WDS (espectroscopia por dispersão de comprimento de ondas de raios-X); com os detectores: SE (elétrons secundários); BSE (eletrons retro-espalhados); SCM (Specimen Current Measurements); Catôdo luminescência.



Figura 5.20 - Microscópio eletrônico de varredura STEREOSCAN 440 com as amostras.

Princípio

Um feixe fino de elétrons de alta energia incide na superfície da amostra, parte do feixe é refletida e coletada por um detector que converte este sinal em imagem. Há uma interação entre o feixe incidente e a superfície analisada e uma das consequências é a produção de raios-X que fornecem a composição química elementar de um ponto ou região da superfície, possibilitando a identificação de praticamente qualquer elemento presente.

5.5.6.3. Tensão Residual

Os ensaios para a obtenção da tensão residual foram realizados no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Para todas as peças avaliadas a componente de tensão residual era tangente à superfície de medida ao longo da circunferência. Para isto ajustou-se as amostras

possibilitando a fixação e o deslocamento da mesma no difratômetro, sendo que as medidas eram obtidas 10 μm abaixo da superfície.

O equipamento utilizado foi um Difratômetro de Raios X Siemens Modelo D5000 (Figura 5.21) com as seguintes características:

- Tubo de Raios X: Alvo de Cobalto (comprimento de onda ~ 1.789 Angstrom)
- Seqüências: Faixa 2theta de 48 a 56 graus (pico(110) do Fe) para cada difratograma tomadas desde -60 a +60 graus a passos de 10 graus.
- Análise realizada mediante o uso do software S2003 (R.M/2003). O software se baseia na interpretação do chamado método de múltipla exposição onde obtém-se curvas $d X \sin^2 \Psi$.
- A calibração foi realizada através do Método do Meio Feixe tomando-se por base a superfície de medida em cada peça.



Figura 5.21 - Difratômetro de quatro círculos, modelo D5000.

5.6. Seqüência de realização de ensaios

O sistema de fixação dos corpos de prova foi entre pontas, pois este tipo de sistema é um dos mais utilizados na prática garantindo assim rapidez, facilidade de fixação e precisão. O sistema de fixação é um dos pontos de fundamental importância devido ao fato da eliminação de erros oriundos de má fixação, garantindo assim em termos de pesquisa uma maior exatidão e confiabilidade nos resultados.

A retificação de cada um dos corpos de prova possuía três etapas. Em cada etapa executou-se 30 ciclos de retificação com um avanço de 0,1 mm cada, removendo-se 3 mm no diâmetro do material. Ao final das três etapas totalizava-se uma redução de 9 mm no diâmetro.

No intervalo das etapas a peça era lubrificada com lubrificante sólido (graxa) no furo de centro utilizado para fixação com auxílio de uma contra-ponta.

As condições de usinagem utilizadas constantes em todos os ensaios foram:

- ✓ Velocidade de mergulho (v_f) de 1 mm/min;
- ✓ Velocidade de corte (v_s) de 30 m/s;
- ✓ Rotação da peça (ω_w) de 204 rpm;
- ✓ Penetração do rebolo na peça (a) de 0,1 mm;
- ✓ Tempo de *centelhamento* (t_s) igual a 10 segundos;
- ✓ Largura de retificação de 15 mm;
- ✓ Profundidade de dressagem (a_d) de 0,1 mm;
- ✓ Espessura de corte equivalente (h_{eq}) de 0,2 μ m.

A matriz dos ensaios é demonstrada na Tabela 3 e na Figura 22, onde utilizou-se repetibilidade 3 para cada condição.

Tabela 3 – Sequência de ensaios

Condição	Vazão do Fluido [ml/h]	Velocidade do Ar [m/s]	Rebolo
1	40	20	Al ₂ O ₃
2	40	30	Al ₂ O ₃ / CBN
3	40	40	Al ₂ O ₃
4	Convencional*		Al ₂ O ₃ / CBN
5	A Seco		Al ₂ O ₃
6	60	20	Al ₂ O ₃
7	60	30	Al ₂ O ₃ / CBN
8	60	40	Al ₂ O ₃ / CBN

* para a lubri-refrigeração convencional utilizou-se uma vazão de 8,4 l/min.

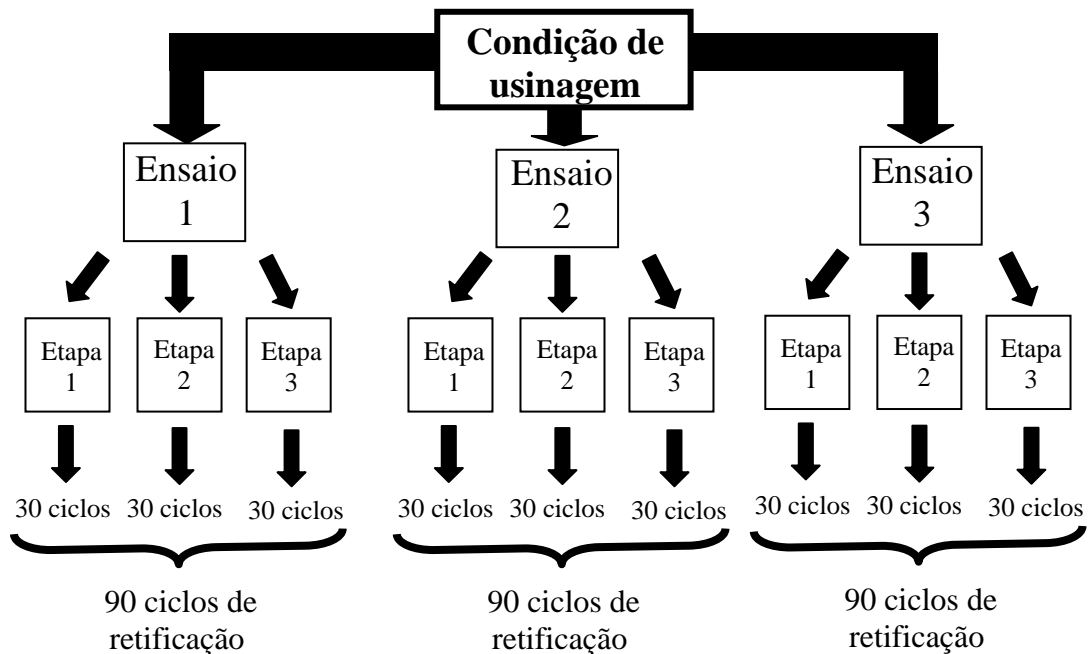


Figura 5.22 – Fluxograma dos ensaios

5.7. Marcação do desgaste do rebolo

Para a obtenção do desgaste diametral de rebolo para cada condição de usinagem foi utilizado um corpo de prova cilíndrico de material ABNT 1020. Os corpos de prova foram inicialmente retificados em ensaios preliminares para garantir uma superfície homogênea. Os corpos de prova eram fixados entre pontas na retificadora e a marcação era realizada de maneira manual realizando uma penetração total de 50 µm após o contato inicial do rebolo na peça conforme Figura 5.23.

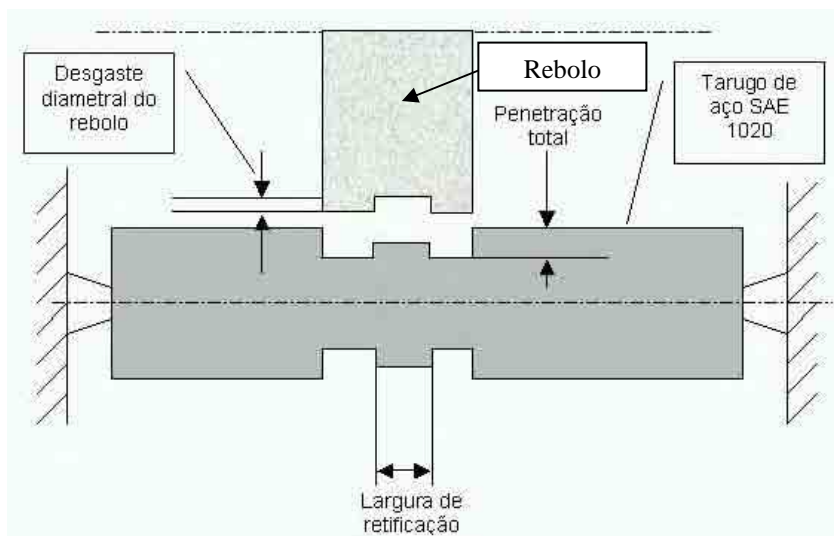


Figura 5.23 - Marcação do desgaste diametral do rebolo

5.8. Dressagem do rebolo

A dressagem do rebolo foi realizada com um dressador tipo fliese (Figura 5.24), após os 90 ciclos de retificação para uma determinada condição. A profundidade de dressagem utilizada para o rebolo de óxido de alumínio foi de 800 μm no total, primeiramente utilizou-se uma penetração de 40 μm até atingir uma profundidade de 700 μm e posteriormente uma penetração de 10 μm até atingir uma profundidade de 100 μm . Para o rebolo de superabrasivo de CBN utilizou-se uma penetração de 2 μm até atingir uma profundidade de 60 μm .

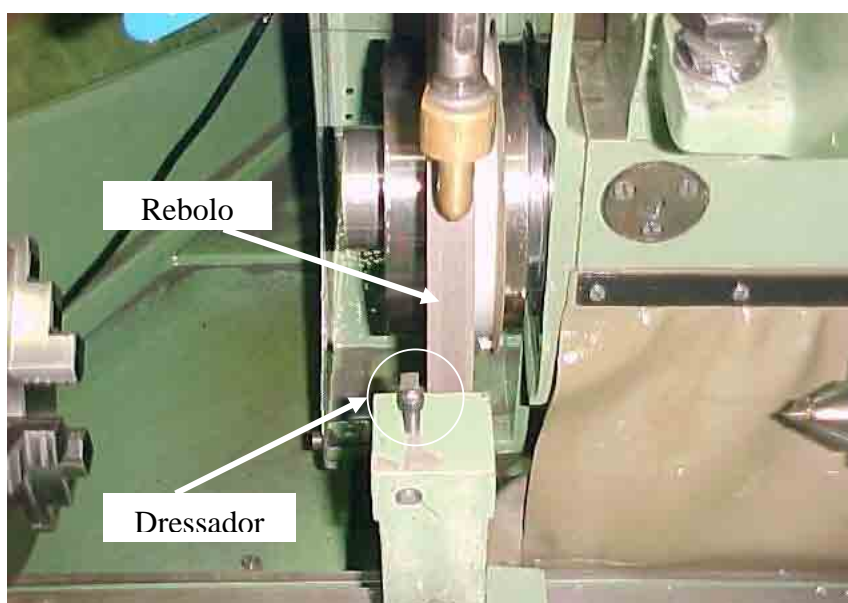


Figura 5.24 - Operação de dressagem

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo serão apresentados os resultados em forma de gráficos obtidos para cada condição de retificação realizada, para a força tangencial de corte, energia específica de retificação, desgaste diametral e integridade superficial. Para a análise da integridade superficial avaliou-se a microestrutura, microdureza, circularidade, rugosidade e tensão residual.

Para a técnica da MQL as vazões para o fluido de corte foram de 40 e 60 ml/h, sendo que para cada vazão utilizou-se de três diferentes velocidades de ar comprimido: 20, 30 e 40 m/s, já para a lubri-refrigeração convencional a vazão do fluido de corte utilizada foi de 8,4 l/min.

6.1. Força Tangencial de Corte

Através da manipulação e conversão dos dados obtidos em tempo real de usinagem construíram-se gráficos para as forças tangenciais de corte, referentes à comparação entre a técnica da MQL e a lubri-refrigeração convencional.

Foram testadas diferentes condições de lubrificação para o rebolo de nitreto cúbico de boro (CBN) e óxido de alumínio (Al_2O_3), mantendo-se constantes alguns parâmetros de entrada conforme citados anteriormente.

6.1.1. Força Tangencial de Corte – Rebolo de Óxido de Alumínio

A Figuras 6.1 a 6.6 representam graficamente a comparação entre os valores de força tangencial de corte com relação à lubri-refrigeração convencional e a técnica da MQL utilizando-se um rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3), onde cada ponto corresponde a uma média aritmética dos valores de pico da força tangencial de corte das três repetibilidades.

Para a técnica da MQL as vazões para o fluido corte foram de 40 e 60ml/h, sendo que para cada vazão utilizou-se de três velocidades distintas de ar comprimido: 20, 30 e 40 m/s. A lubri-refrigeração convencional utilizou uma vazão do fluido de corte de 8,4 l/min.

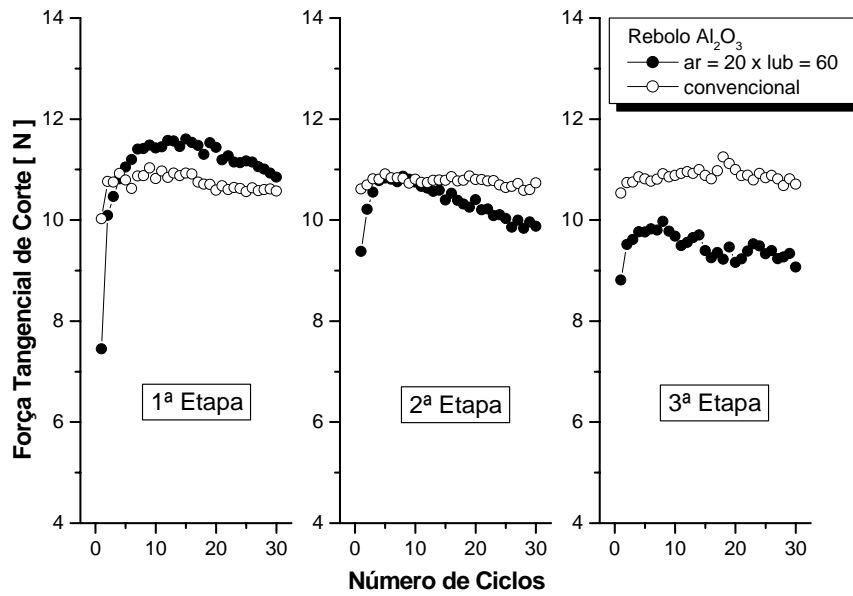


Figura 6.1 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

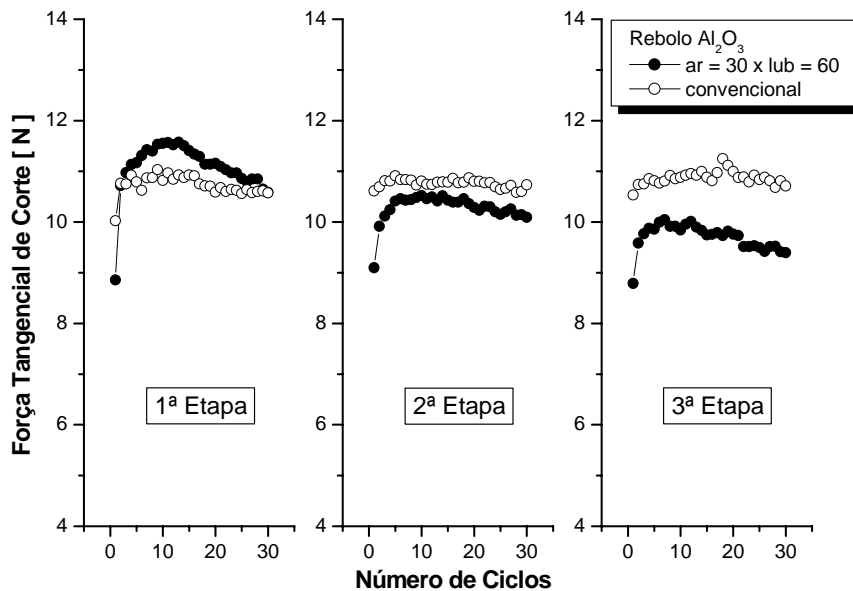


Figura 6.2 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

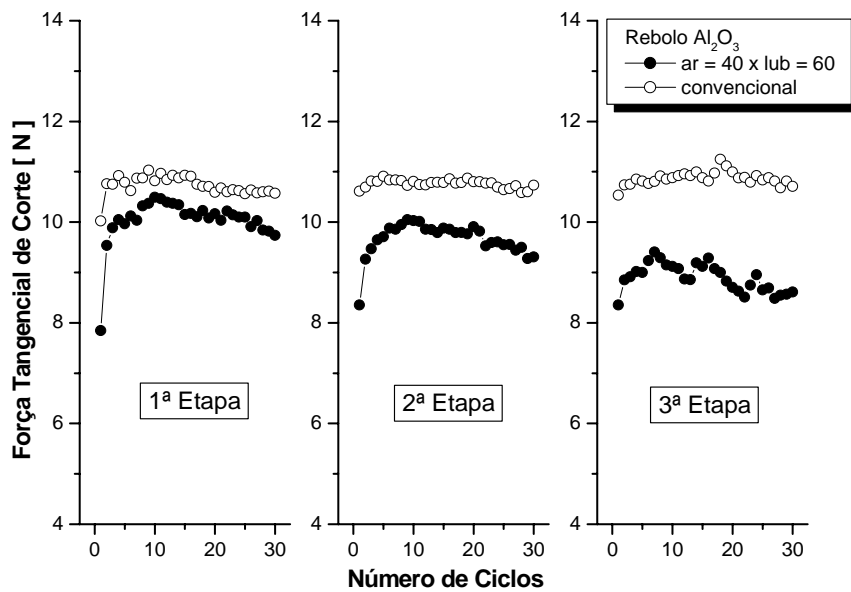


Figura 6.3 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

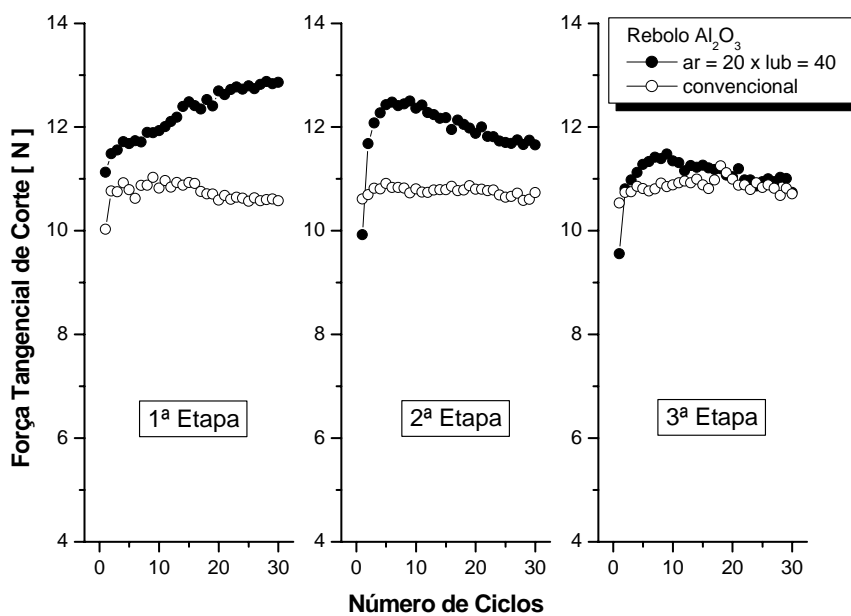


Figura 6.4 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

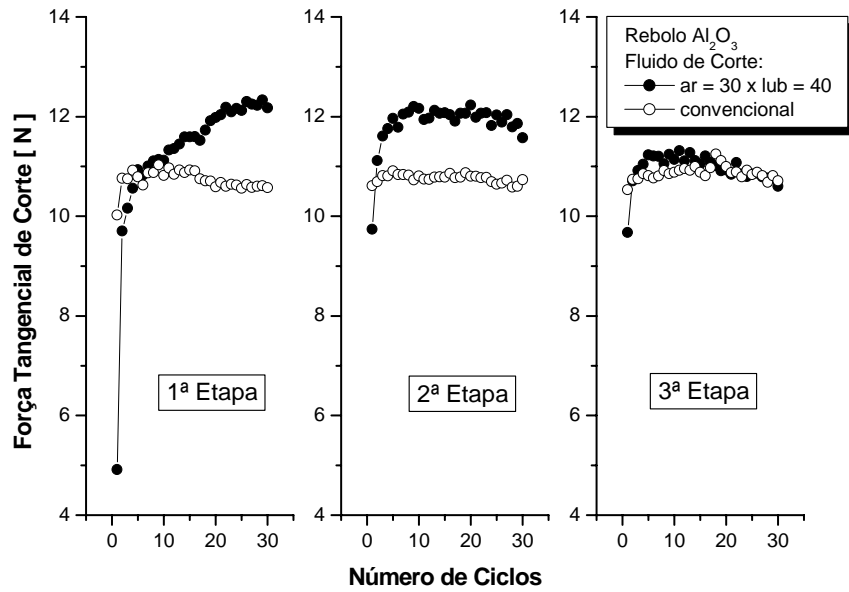


Figura 6.5 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

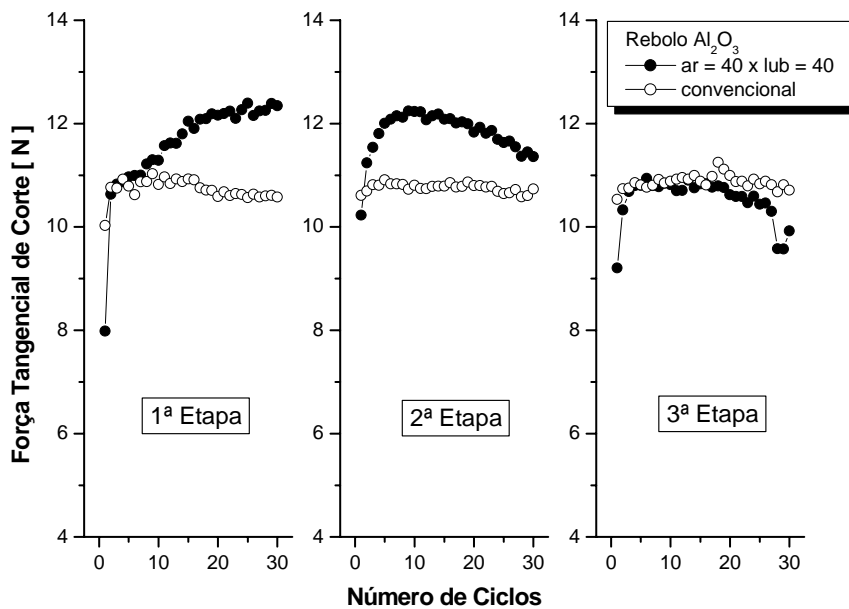


Figura 6.6 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

Analisando-se os gráficos, observa-se que a técnica da MQL alcançou uma correta lubrificação com relação à penetração da mistura ar/fluido na interface da ferramenta com a peça. Isto pode ser mais bem visualizado na terceira etapa, onde os valores de força de corte para todas as condições apresentaram-se menores do que nas primeiras e segundas etapas. O correto posicionamento do fluxo ar/fluido é de fundamental importância tendo em vista que o bocal apresenta uma pequena área de saída, ou seja, uma área limitada de atuação do fluxo de ar/fluido, proporcionando assim uma correta lubrificação da região de corte. A correta lubrificação da região de corte reduz a quantidade de calor gerado devido à diminuição do atrito peça/rebolo, não havendo assim necessidades elevadas de fluido. Outro fator influenciado pela correta lubrificação é a melhora do deslizamento e remoção de cavacos proporcionando assim um menor consumo de energia.

Pode-se observar que com o aumento da velocidade de aplicação do ar comprimido a tendência da força tangencial de corte é diminuir, principalmente quando estes valores são iguais ou superiores à velocidade periférica do rebolo (30 m/s), isto ocorre devido ao fato de que o fluxo ar/fluido penetra de maneira eficiente na região de corte vencendo a barreira de ar periférica gerada em torno do rebolo.

Outro ponto a se observar com relação à diminuição da força de corte durante as etapas, é referente a diminuição do diâmetro da peça resultando em um menor arco de contato (l_c), mas por outro lado ocorre também uma redução da velocidade periférica da peça (V_w) pois a rotação da peça foi mantida constante em 204 rpm, proporcionando assim um maior tempo de contato da ferramenta com a peça, possibilitando assim uma tendência de aumento da temperatura. O aumento da temperatura faz com que a resistência do material diminua conseqüentemente a força de corte também sofre uma diminuição. De acordo com Tonshoff (1992) *apud* Weingaertner et al. (2001), o aumento da velocidade periférica da peça ocasiona uma redução da temperatura na região de contato. Com a diminuição da velocidade periférica da peça ocorre uma diminuição da espessura de corte equivalente (h_{eq}) gerando menores forças de corte, pois os esforços sobre os grãos abrasivos são menores. Fato que não foi observado na lubri-refrigeração convencional, onde a força manteve-se praticamente constante durante as três etapas, isto se deve provavelmente ao fato de que a dissipação do calor tenha ocorrido de forma mais eficiente.

Comparando-se a variação da força de corte com relação ao aumento da vazão de fluido de corte de 40 para 60 ml/h notou-se uma diminuição da força de corte, o mesmo ocorrendo para o aumento da velocidade do ar comprimido de 20 para 40 m/s.

A condição que apresentou o melhor desempenho com relação à lubri-refrigeração convencional foi com $V_{ar} = 40$ m/s e $Q_{fluido} = 60$ ml/h nas três etapas do ensaio, isto se deve ao fato de que o jato de ar/fluido conseguiu de maneira eficiente vencer a barreira aerodinâmica gerada na periferia do rebolo favorecendo assim a lubrificação na interface rebolo-peça.

A Figura 6.7 representa a comparação entre a retificação com lubri-refrigeração convencional com vazão igual a 8,4 l/min e a seco (sem fluido), apenas para efeito comparativo, pois atualmente sabe-se que é necessária a presença de fluido de corte na retificação devido a limitações do processo, pois o fluido de corte é responsável pela diminuição de temperatura, melhora na rugosidade e tensão residual. Portanto a ausência de fluido de corte impossibilita a produção de peças que exijam baixas tolerâncias finais.

Os menores valores de força de corte para a retificação a seco com relação a lubri-refrigeração convencional comprova que houve um aumento de temperatura na região de corte diminuindo-se o limite de resistência do material ocasionando menores valores de forças. A condição a seco por sua vez também apresentou um desempenho para a força de corte abaixo da MQL, pois a MQL é uma condição intermediária entre lubri-refrigeração convencional e a condição a seco.

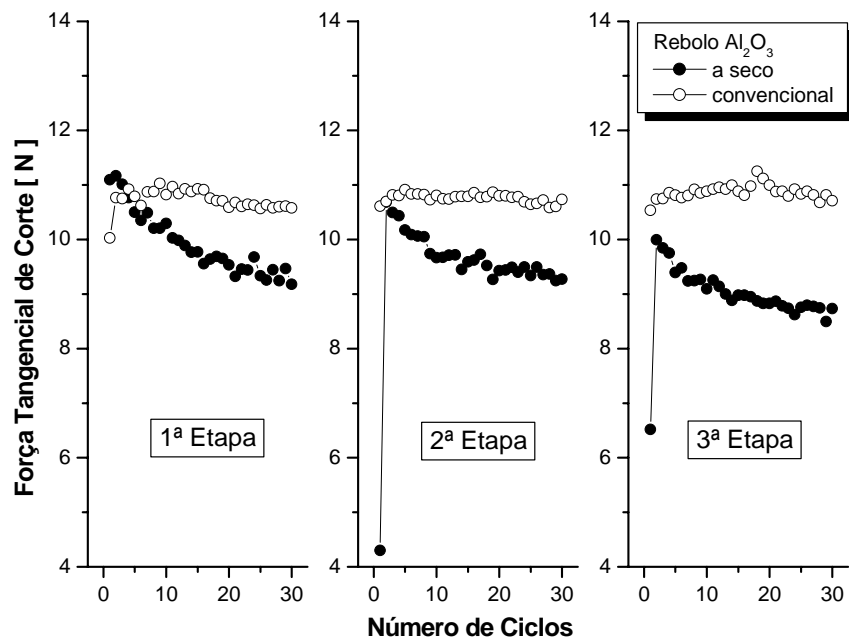


Figura 6.7 - Força Tangencial de Corte para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, sem refrigeração (a seco)

6.1.2. Força Tangencial de Corte – Rebolo de CBN

A Figuras 6.8 a 6.10 representam graficamente a comparação entre os valores de força tangencial de corte com relação à lubri-refrigeração convencional com vazão igual a 8,4 l/min e a técnica da MQL.

Durante os ensaios com o rebolo de CBN obteve-se resultados insatisfatórios para a rugosidade e o desgaste diametral, justificativa esta por não utiliza-la para todas as condições de retificação previamente definidas. Um outro fator que delimitou a utilização desta ferramenta foi a alta dureza apresentada pelo ligante, além do mais rebolos superabrasivos possuem recomendações de trabalho com velocidade de corte elevada (acima de 45 m/s) e máquinas com alta rigidez, uma característica não alcançada com o equipamento utilizado.

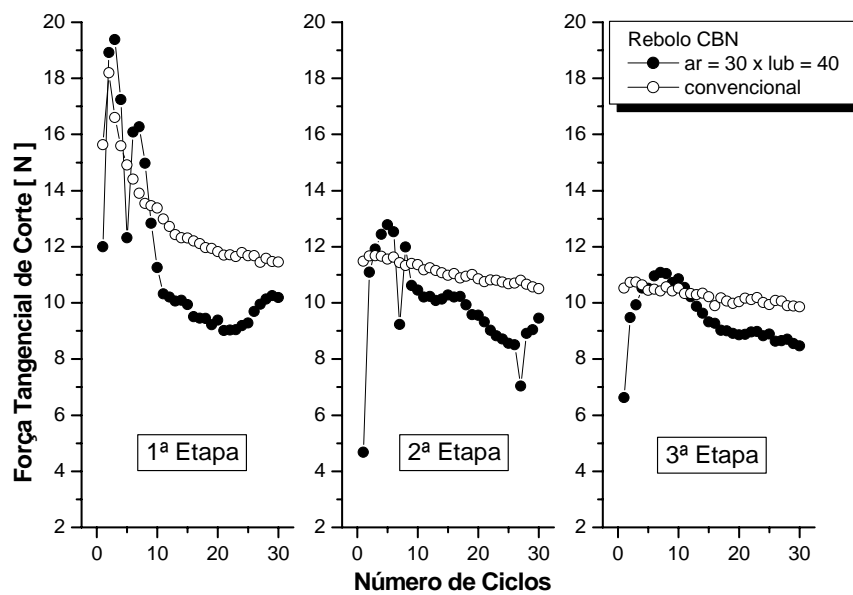


Figura 6.8 - Força tangencial de corte para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

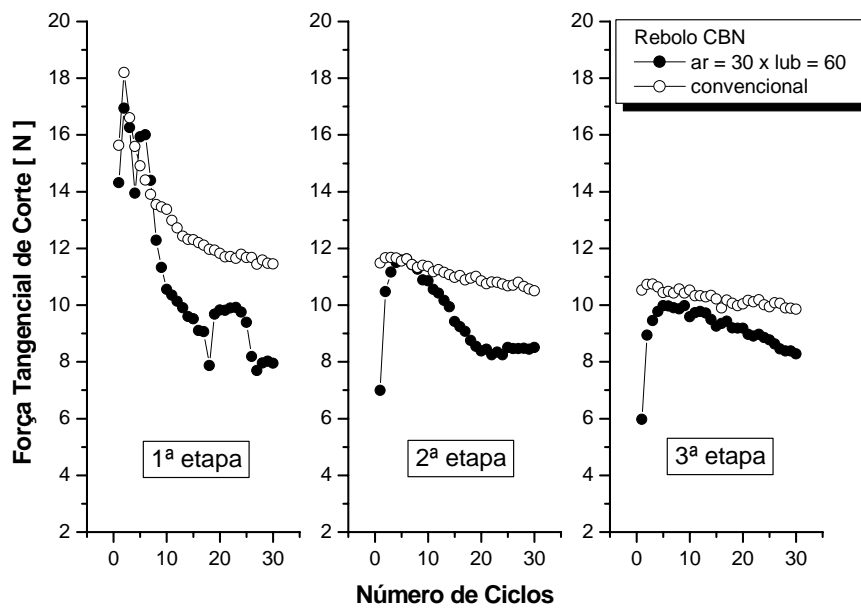


Figura 6.9 - Força tangencial de corte para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional
 vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60
 ml/h

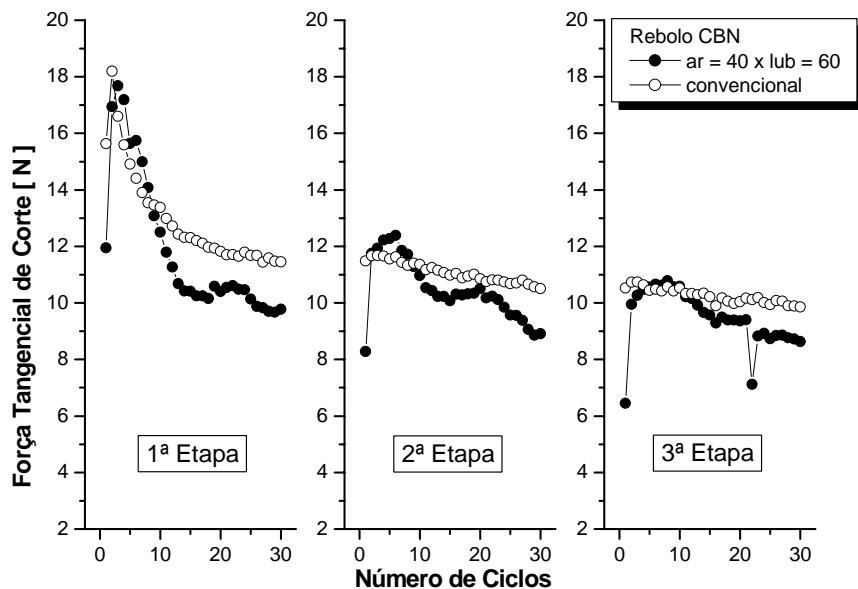


Figura 6.10 - Força tangencial de corte para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional
 vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60
 ml/h

Analisando-se os gráficos verifica-se que os menores valores de força foram obtidos na terceira etapa, pois menores esforços para a retificação são alcançados devido a maior dureza dos grãos abrasivos, segundo Felipe Jr (1992) a dureza *knoop* do grão abrasivo de CBN é de 4500 e do grão abrasivo de Al_2O_3 é de 2500 kg/mm^2 .

Os valores da força de corte apresentados com a utilização da técnica da MQL apresentam valores significativamente menores quando comparados a lubri-refrigeração convencional, devido a excelente manutenção de afiação promovida pelo rebolo de CBN.

O rebolo de CBN apresentou um comportamento semelhante ao rebolo de óxido de alumínio com relação a aplicação da MQL e da lubri-refrigeração convencional. Mas nota-se que nos primeiros ciclos de todas as condições, maiores valores para a força de corte, que ao longo dos ciclos vai decrescendo devido a renovação das arestas de corte e a capacidade de auto-afiação do rebolo. Em contrapartida esta ferramenta apresentou um desgaste significativo no diâmetro conforme demonstrado posteriormente no item 6.5.

6.2. Energia Específica de Retificação

6.2.1. Energia Específica de Retificação – Rebolo de Óxido de Alumínio

Os gráficos de energia específica de retificação foram obtidos a partir da Equação 8, que envolve variáveis como a força tangencial de corte (F_{tc}), velocidade periférica do rebolo (V_s), diâmetro da peça (d_w), velocidade de avanço (V_f) e largura de retificação (b). As Figuras 6.11 a 6.16 representam uma análise comparativa para o rebolo de óxido de alumínio entre a condição refrigerada com vazão fixa 8,4 l/min e as condições de MQL, onde para as vazões do fluido de corte utilizou-se 40 e 60 ml/h e para as velocidades do ar comprimido utilizou-se 20, 30 e 40 m/s.

Os ensaios ocorreram em três etapas, com 30 ciclos cada etapa, totalizando 90 ciclos de retificação.

A análise dos gráficos permite observar que os comportamentos dos gráficos foram semelhantes ao da força tangencial de corte, pois a energia específica de retificação é uma variável diretamente proporcional a força de corte. Com a diminuição do diâmetro da peça, que é uma variável inversamente proporcional, observa-se que ocorre um aumento gradativo da energia específica de retificação.

Para a vazão de lubrificante igual a 60 ml/h em todas as velocidades de ar comprimido (20,30 e 40 m/s) a técnica da MQL apresentou valores de energia específica de retificação significativamente menores quando comparadas à lubri-refrigeração convencional, principalmente na terceira etapa, comprovando assim a eficiência da penetração do jato de ar/fluido na peça e uma boa lubrificação da região de corte.

A boa lubrificação da região de corte permite menores valores de força de corte, pois durante a formação do cavaco o deslizamento do mesmo é favorecido, gerando conseqüentemente menores valores de energia específica de retificação. Para a obtenção dos valores de energia específica de retificação levou-se em consideração a redução do diâmetro da peça, o que não ocorre com a força de corte.

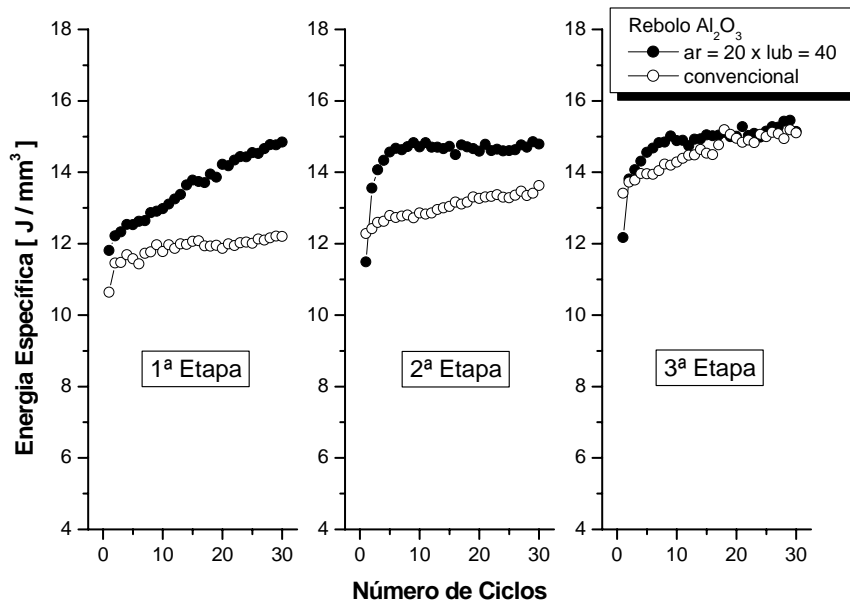


Figura 6.11 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

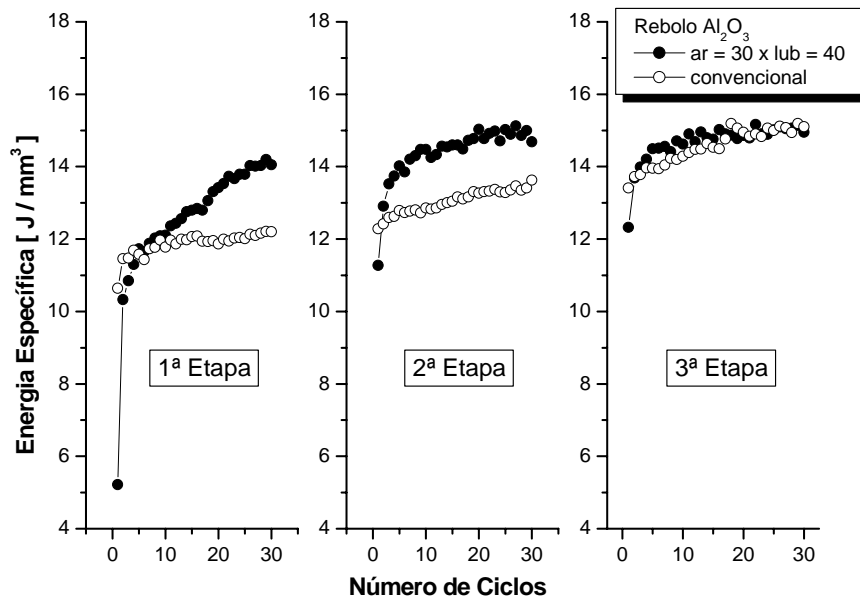


Figura 6.12 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

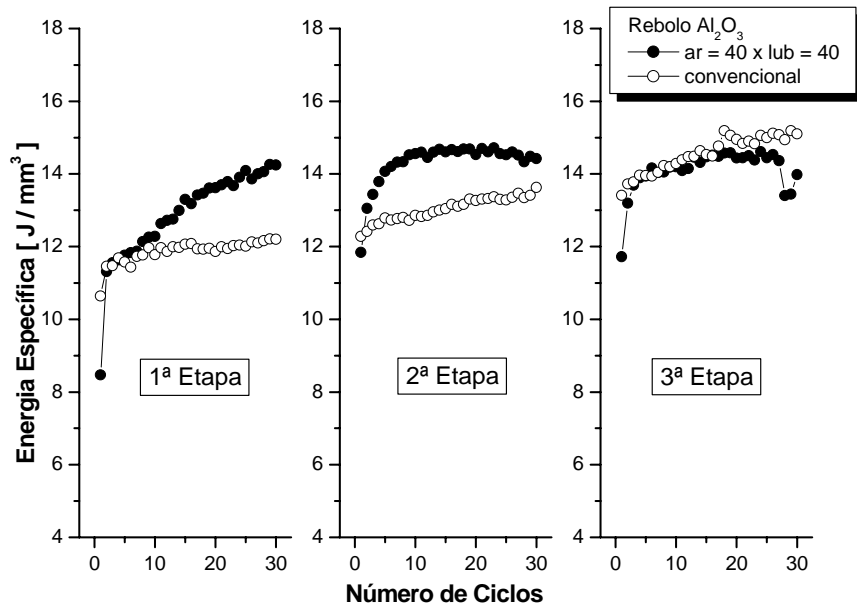


Figura 6.13 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

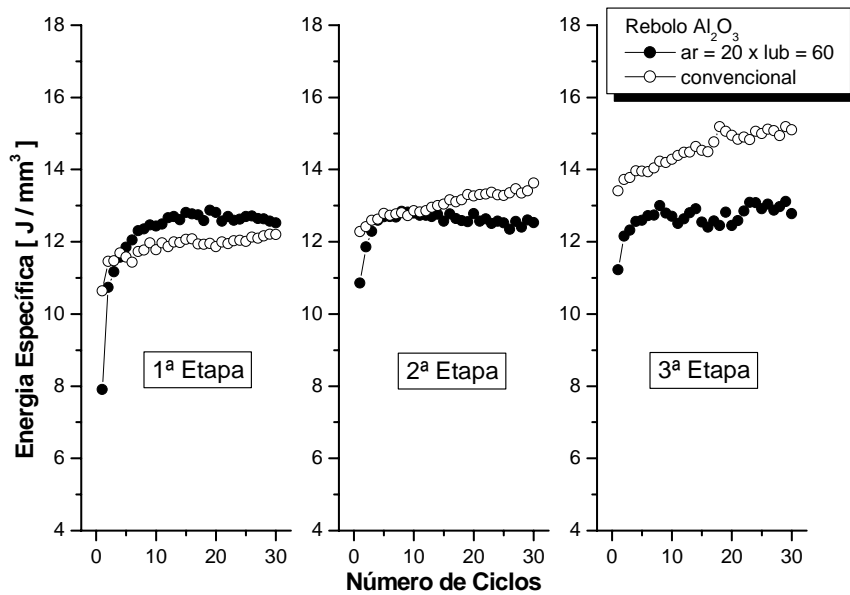


Figura 6.14 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

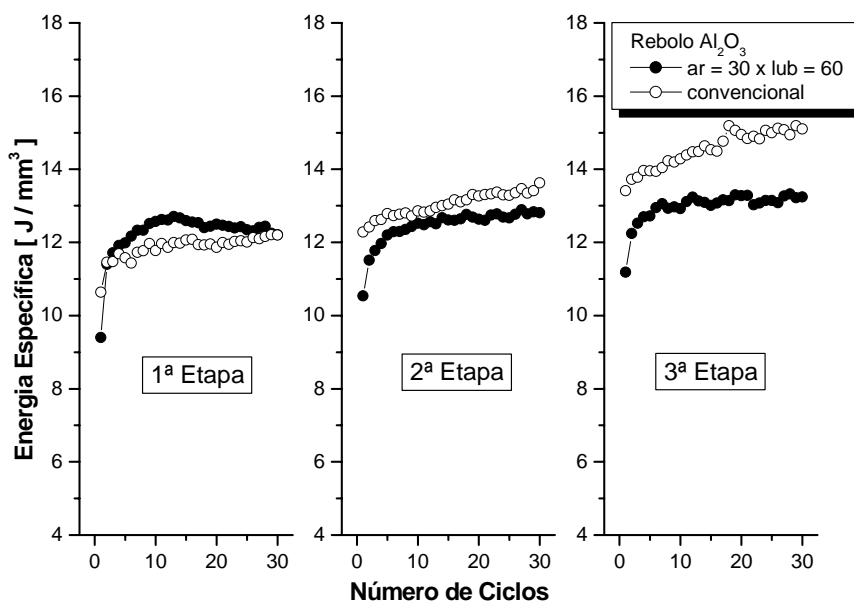


Figura 6.15 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

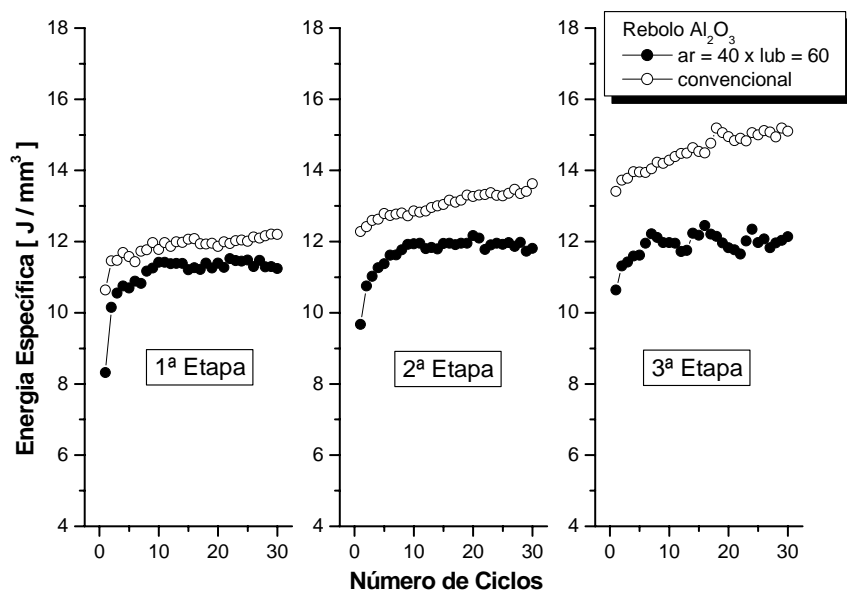


Figura 6.16 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

A Figura 6.17 apresenta a comparação entre a lubri-refrigeração convencional (8,4 l/min) e a condição a seco (sem refrigeração) para o rebolo de óxido de alumínio, onde o ensaio possui 3 etapas, com 30 ciclos cada e totalizando 90 ciclos de retificação. Pela análise do gráfico observa-se que os valores de energia específica de retificação para a condição a seco foram menores com relação a condição refrigerada, pois a falta de fluido de corte faz com que ocorra um grande aquecimento durante o processo de retificação, transferindo calor principalmente para a peça, diminuindo o limite de resistência do material, ocasionando assim um decréscimo da força de corte. A diminuição da força de corte, que é uma variável diretamente proporcional, faz com que a energia específica de retificação também diminua.

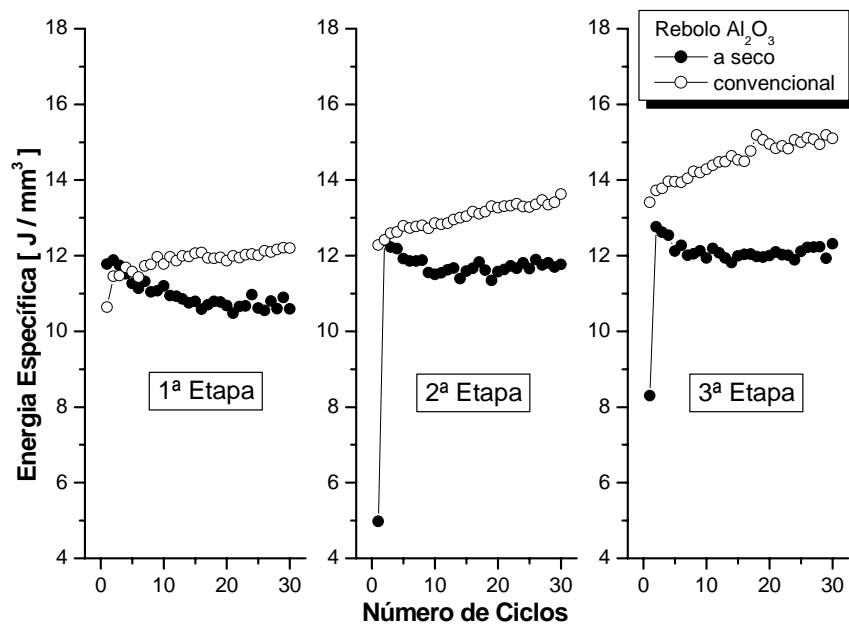


Figura 6.17 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, sem refrigeração (a seco)

6.2.2. Energia Específica de Retificação – Rebolo de CBN

Os gráficos das Figuras 6.18 a 6.20 são referentes a utilização de uma ferramenta superabrasiva (CBN) para análise comparativa entre a lubri-refrigeração convencional (8,4 l/min) e a técnica MQL, cujas variações para as vazões do fluido de corte foram 40 e 60 ml/h e velocidade do ar comprimido de 30 e 40 m/s. Através da análise dos gráficos nota-se que a técnica MQL apresentou menores valores de energia específica de retificação com relação a lubri-refrigeração convencional, pois o jato de ar/fluido atingiu de maneira eficiente a região de corte, proporcionando uma boa lubrificação e conseqüentemente menores valores de força de corte que por sua vez resultam em menores valores de energia específica de retificação.

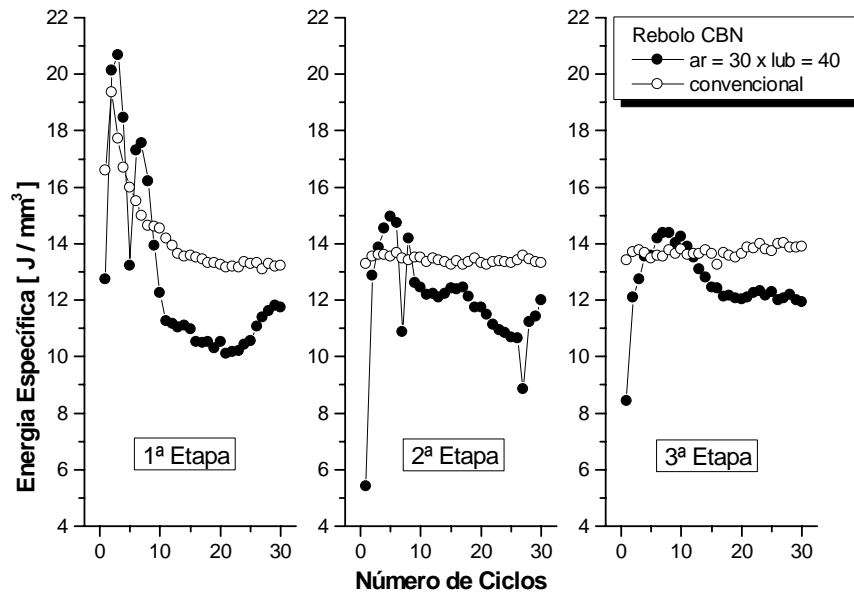


Figura 6.18 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

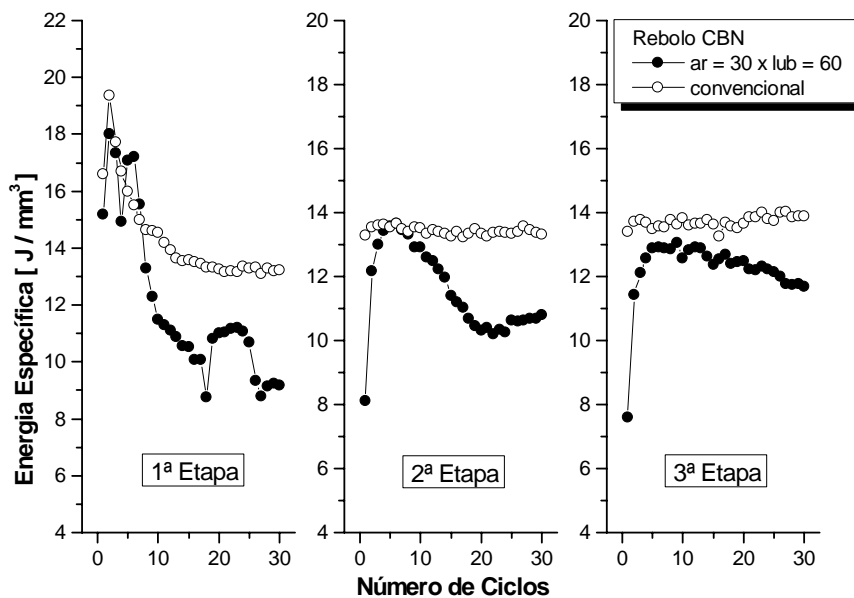


Figura 6.19 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

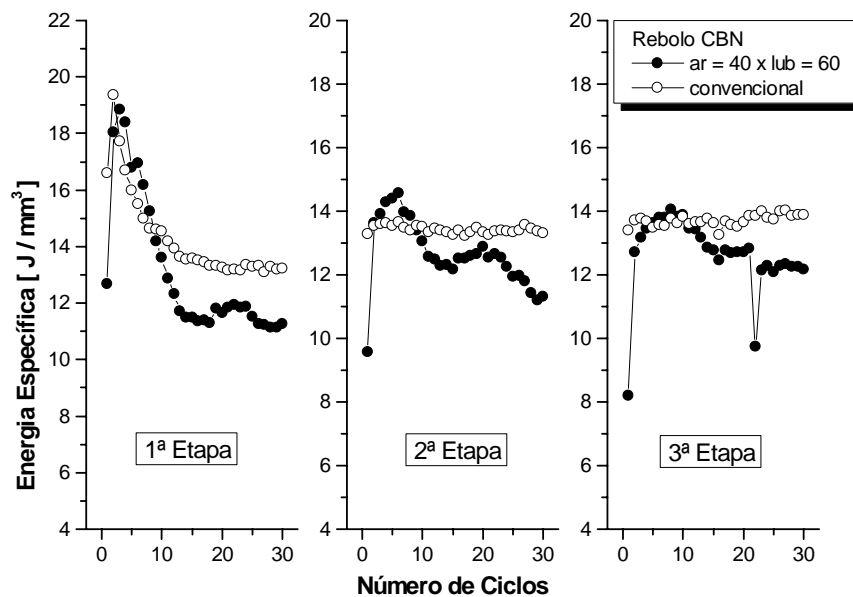


Figura 6.20 - Energia Específica de Retificação para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

6.3. Tensão Residual

Os valores para a tensão residual foram obtidos para apenas algumas condições de usinagem, devido ao alto custo para análise, foram escolhidas as condições que demonstraram em uma pré-análise os melhores valores para proporcionar uma melhor avaliação comparativa entre os métodos. Nesta pré-análise foram analisados os resultados com relação à rugosidade e força tangencial de corte. Para obtenção dos valores de tensões residuais não foram realizadas repetibilidades, deste modo não foi possível a construção do gráfico (conforme Figura 6.21) com a inserção das barras de erros.

Os resultados são referentes aos ensaios que utilizaram lubri-refrigeração convencional (8,4 l/min), a técnica da MQL e sem refrigeração, para os rebolos de óxido de alumínio (Al_2O_3) e superabrasivo (CBN). Realizou-se também a medição de tensão residual para a condição inicial da peça, ou seja, temperada e revenida, para melhorar a análise dos resultados.

Os ensaios foram realizados em 3 etapas, com 30 ciclos cada, totalizando-se 90 ciclos de retificação, com uma remoção de 9 mm no diâmetro da peça.

As deformações plásticas não uniformes nas proximidades da superfície podem induzir a formação de tensões residuais no material. Segundo MALKIN (1989) e WEINGAERTNER et al (2001), três fatores poderiam induzir a formações de tensão residual: influência mecânica, influência das transformações microestruturais e influência da dilatação térmica. Dependendo do tipo de material e condições de usinagem as alterações microestruturais podem gerar tensões de tração ou compressão. As dilatações térmicas na retificação são proporcionais as temperaturas geradas no processo, onde as camadas externas são expostas a maiores temperaturas do que as camadas internas, dilatando-se mais do que as camadas internas gerando tensões de compressão.

Através da análise do gráfico da Figura 6.21 nota-se que a técnica da MQL apresentou resultados superiores com relação a condição de lubri-refrigeração convencional (8,4 l/min), tanto para o rebolo de óxido de alumínio como o superabrasivo, onde todas as tensões residuais para a técnica da MQL foram de compressão. As tensões residuais de compressão são consideradas benéficas nas propriedades mecânicas dos materiais, pois aumentam a resistência à fadiga, ou seja quanto maiores melhores são as propriedades mecânicas do material. Já as tensões residuais de tração prejudicam a resistência mecânica a corrosão e ao desgaste.

O maior valor de tensão residual foi obtido para o rebolo superabrasivo, com um valor de - 664 MPa para a técnica da MQL ($V_{ar} = 40$ ml/h e $Q_{lub} = 60$ m/s) contra - 476 MPa para a condição refrigerada para o mesmo rebolo, uma diferença percentual de 39,5%. O melhor desempenho para o rebolo já era esperado devido ao fato de que esta ferramenta possui melhor condutividade térmica dos grãos de CBN. Já para o rebolo de óxido de alumínio o maior valor encontrando para a tensão foi de - 376 MPa para a técnica da MQL ($V_{ar} = 30$ ml/h e $Q_{lub} = 40$ m/s) contra - 160 MPa para a condição refrigerada, representando uma diferença percentual de 135%.

Os valores de tensão residuais de compressão gerados com a técnica da MQL indicam que o jato de ar/fluido penetrou de maneira eficiente na região de corte proporcionando uma boa lubrificação, reduzindo o atrito peça/rebolo e contribuindo para a manutenção da afiação do rebolo.

A condição a seco (sem fluido) para o rebolo de óxido de alumínio também apresentou uma tensão residual de compressão, mas em menor valor. Este resultado já era esperado devido a ausência de fluido de corte na retificação gerando altas taxas de calor para a peça que por sua vez possuía um resfriamento lento, influenciando alterações microestruturais próximas à superfície.

Analisando-se todas as condições de usinagem com relação à peça submetida a têmpera e revenimento, nota-se que as condições testadas resultaram em valores de tensão residual de compressão maiores, que são benéficas às propriedades mecânicas do material, proporcionando assim uma melhoria na integridade superficial.

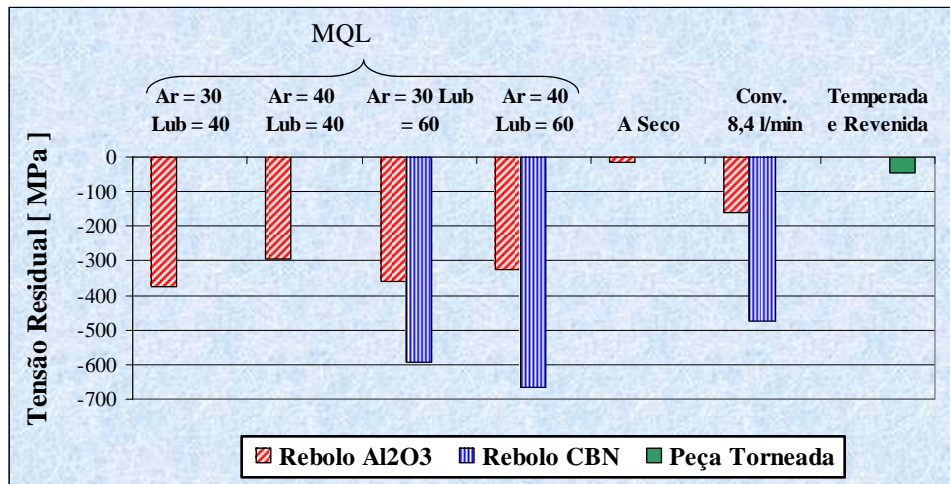


Figura 6.21 - Tensão residual

6.4. Circularidade

Os resultados para a circularidade foram obtidos para todas as condições de usinagem realizadas, sendo que para cada condição a circularidade foi obtida após a 3ª etapa, ou seja, após 90º ciclos de retificação. Todas as condições foram realizadas em três etapas com 30 ciclos cada etapa, totalizando 90 ciclos de retificação.

Utilizou-se repetibilidade 3 para cada condição de usinagem. O gráfico da Figura 6.22, representa para cada condição uma média das repetições com o seu respectivo desvio padrão. O gráfico representa os resultados referentes a utilização de rebolo de óxido de alumínio (Al₂O₃) e superabrasivo (CBN), sob aplicação da técnica da MQL, lubri-refrigeração convencional e a seco (sem fluido).

Analisando-se os resultados de circularidade obtidos para o rebolo de óxido de alumínio pode-se observar que de um modo geral a técnica da MQL apresentou valores sem diferenças significativas com relação à lubri-refrigeração convencional. Verifica-se também que não existe diferença significativa para as variações de velocidade de ar comprimido (20,30 e 40 m/s) para a vazão de 40 ml/h e 60 ml/h. De um modo geral os resultados obtidos não apresentaram um comportamento esperado, mas os valores de circularidade obtidos para

o rebolo de CBN foram menores do que para o rebolo de óxido de alumínio. Deve-se ressaltar que o posicionamento incorreto do bocal pode afetar o direcionamento do jato ar/fluido na interface peça/rebolo prejudicando a lubrificação e a circularidade. O valor máximo do erro de circularidade obtido para o rebolo de óxido foi 1,58 μm e 0,74 μm para o rebolo de CBN, sendo valores aceitáveis para a tolerância ISO IT6.

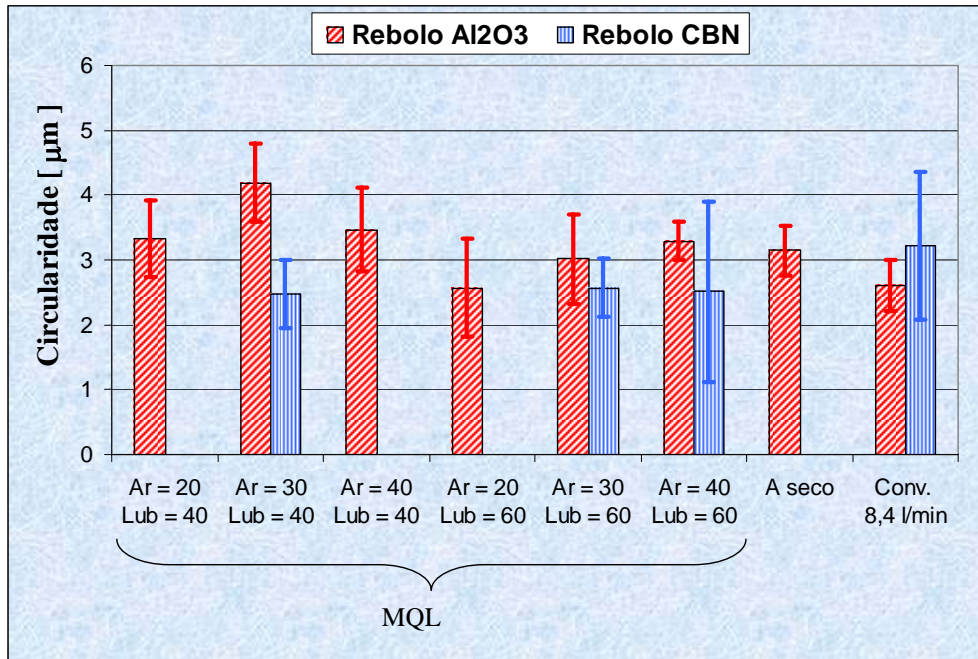


Figura 6.22 - Circularidade

6.5. Desgaste diametral da ferramenta

A obtenção do desgaste diametral do rebolo foi possível devido a não utilização da largura total do rebolo, onde a largura do rebolo utilizado era de 25 mm e a largura da peça 14 mm. Desta forma o ressalto produzido no rebolo após o ensaio possibilitou a marcação do desgaste diametral do rebolo em um corpo de prova cilíndrico.

A Figura 6.23 representa a comparação gráfica entre a técnica da MQL, lubri-refrigeração convencional (8,4 l/min) e a seco. Utilizando-se um rebolo do óxido de alumínio (Al₂O₃) e superabrasivo (CBN), sob diferentes vazões do fluido de corte e velocidades do ar comprimido. Para cada condição realizou-se 3 etapas com 30 ciclos cada, totalizando 90 ciclos de retificação. A marcação do desgaste diametral do rebolo foi obtido após o ultimo ciclo de retificação (90^a ciclo).

Através da análise do gráfico é possível notar que para a utilização do rebolo de óxido de alumínio a MQL mostrou-se superior quando comparado com a lubri-refrigeração convencional em todas as condições utilizadas. Os menor valor de desgaste diametral para a técnica da MQL foi obtido para a condição de $V_{ar} = 40$ m/s e $Q_{lub} = 60$ ml/h com uma diferença percentual de 50% com relação a condição de lubri-refrigeração convencional, resultado obtido graças a excelente capacidade de lubrificação alcançada na região de contato peça/rebolo que reduz o atrito entre grão/peça e cavaco/ligante, permitindo assim que os grãos abrasivos permaneçam por mais tempo ao ligante ocasionando menor desgaste do rebolo.

Para a condição utilizando-se rebolo superabrasivo nota-se que não houve um comportamento padrão para a técnica MQL, obtendo-se condições acima e baixo a condição de lubri-refrigeração convencional. Um dos possíveis causadores destes resultados é a elevada dureza apresentada durante os ensaios apresentando um macro desgaste no rebolo, falta de velocidade de corte adequada para utilização de rebolos superabrasivos devido a limitações técnicas.

Analisando-se a condição a seco para o rebolo de óxido de alumínio observa-se que esta apresentou um valor para o desgaste diametral menor do que a condição de lubri-refrigeração convencional, pois a condição de usinagem sem fluido gera grandes taxas de calor o que provoca uma diminuição de resistência mecânica do material, diminuindo a força de corte, energia específica de retificação e o desgaste do rebolo.

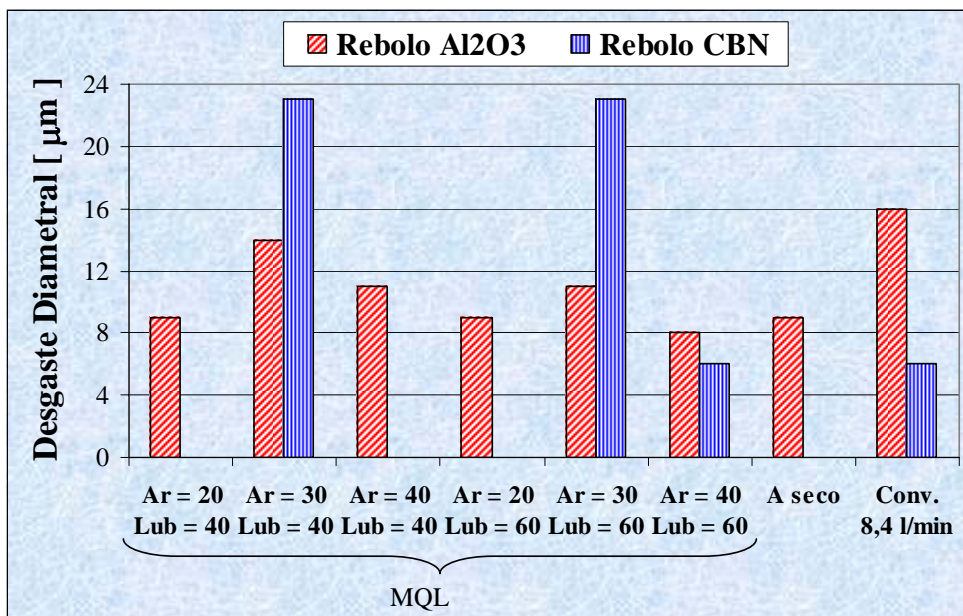


Figura 6.23 - Desgaste diametral do rebolo

6.6. Rugosidade

A Figura 6.24 apresenta os resultados obtidos para a rugosidade média Ra em forma de gráfico, referente à comparação entre rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3) e superabrasivo (CBN), para a condição de lubri-refrigeração convencional, MQL e a seco. Os valores de rugosidade apresentados são médias de quatro medições de rugosidade em diferentes posições, com seus respectivos desvios padrões. Os ensaios foram realizados em três etapas com 30 ciclos cada e totalizando-se 90 ciclos de retificação, as rugosidades apresentadas são referentes ao último ciclo de retificação (90^a ciclo).

Analisando-se os resultados obtidos observa-se de uma maneira geral que para o rebolo de óxido de alumínio os valores de rugosidade foram menores para a técnica da MQL do que na lubri-refrigeração convencional. Sendo que os menores valores são observados para a técnica da MQL são para $V_{ar} = 20$ m/s e $Q_{fluido} = 60$ ml/h, onde para todas as vazões de ar comprimido existe diferença significativa com relação à condição de lubri-refrigeração convencional levando-se em consideração o desvio padrão apresentado. Para $Q_{fluido} = 40$ ml/h os valores obtidos foram maiores com relação a $Q_{fluido} = 60$ ml/h, comprovando-se assim que a maior quantidade de fluido possibilitou menores valores de rugosidade devido a maior lubrificação alcançada. Para a MQL o menor valor de rugosidade foi de $0,41 \mu m$ e para a lubri-refrigeração convencional o valor foi de $0,60 \mu m$.

Pode-se dizer que a rugosidade da peça retificada é influenciada principalmente pelo tamanho de grão abrasivo do rebolo, centelhamento, dressagem, taxa de remoção do material e condições de lubrificação. O fluido de corte tipo emulsão, apresenta como característica marcante a refrigeração e baixa lubrificação da peça afetando assim a rugosidade.

Com relação à utilização do rebolo de CBN os valores obtidos para a técnica da MQL foram muito superiores aos encontrados para a lubri-refrigeração convencional, devido à alta dureza apresentada pela ferramenta o que provoca um macro-desgaste, dificultando assim o corte e aumentando a rugosidade da peça.

A condição a seco (sem fluido) apresentou um valor de rugosidade próximo as demais condições, um resultado inesperado, pois previa-se um valor muito superior devido ao entupimento da porosidade do rebolo. Além do mais, esta condição apresentou uma temperatura elevada devido a ausência de fluido.

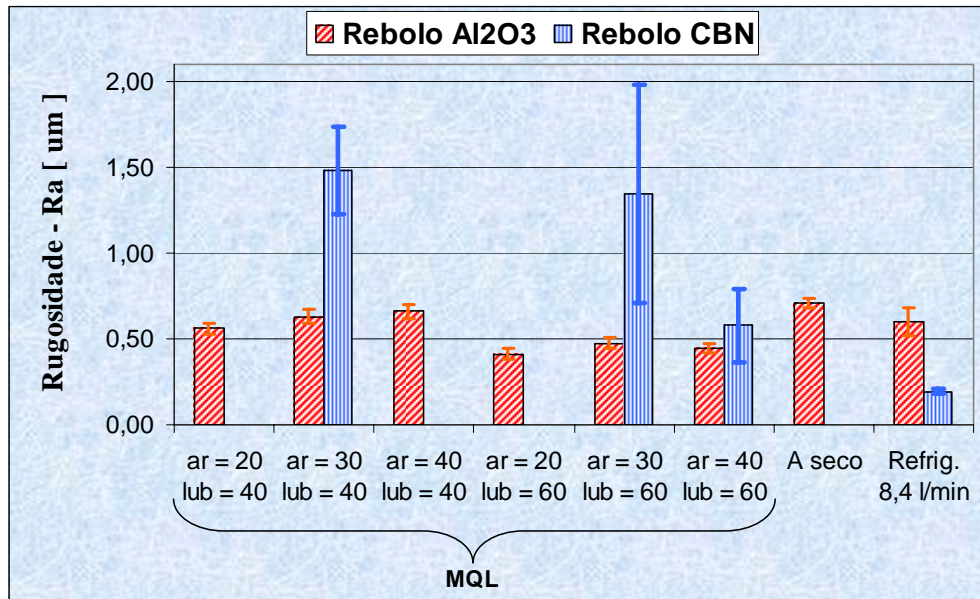


Figura 6.24 - Rugosidade

6.7. Microdureza

6.7.1. Microdureza – Rebolo de Óxido de Alumínio

As Figuras 6.25 a 6.30 apresentam os resultados em forma de gráficos para o rebolo de óxido de alumínio, para análise comparativa entre a condição de lubri-refrigeração convencional (8,4 l/min), aplicação da técnica da MQL e à condição a seco. Para a técnica da MQL foram testadas duas vazões de fluido (40 e 60 ml/h) e três velocidades do ar comprimido (20, 30 e 40 m/s).

Analisando-se os resultados obtidos para a microdureza em todas as condições pode-se observar que as alterações mais significativas ocorreram até 50 μm , com exceção da amostra do tratamento térmico que teve uma alteração de 150 μm . A partir de 50 μm de profundidade, o comportamento foi praticamente constante para todas as condições testadas. Vale ressaltar que as microdurezas encontradas nas regiões subsuperficiais para todas as condições apresentaram valores maiores do que a peça tratada termicamente, confirmando que as condições de usinagem adotadas foram eficazes, não produzindo alterações térmicas significativas à peça. Pois, sabe-se que o processo de retificação produz elevadas temperaturas que podem produzir vários tipos de danos térmicos à peça, inclusive alterações na microdureza.

Analisando-se a retificação a seco (sem fluido) pode-se verificar menores valores de microdureza, pois como comentado anteriormente na análise da microestrutura, a condição a seco gera maiores temperaturas na região de corte que fluem para a peça, seguida de resfriamento lento, ocasionando assim um revenimento mais efetivo resultando em menores valores de microdureza.

Os valores de microdureza encontrados para a MQL não apresentaram um comportamento padrão, não apresentando uma tendência abaixo de 50 μm . Já a lubri-refrigeração convencional apresenta menor dispersão dos valores de microdureza quando comparados com a MQL.

De uma maneira geral pode-se dizer que para todas as condições não houveram alterações significativas nas microdurezas, reforçando a eficiência da técnica da MQL, juntamente com a rugosidade, tensão residual e MEV.

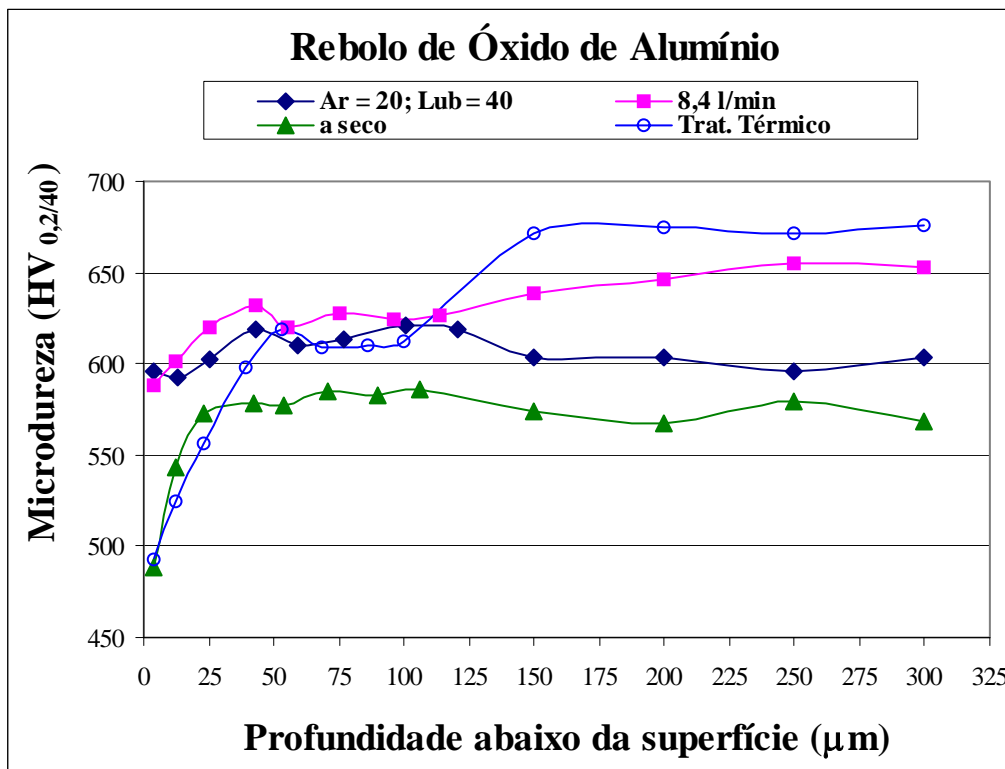


Figura 6.25 - Microdureza para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

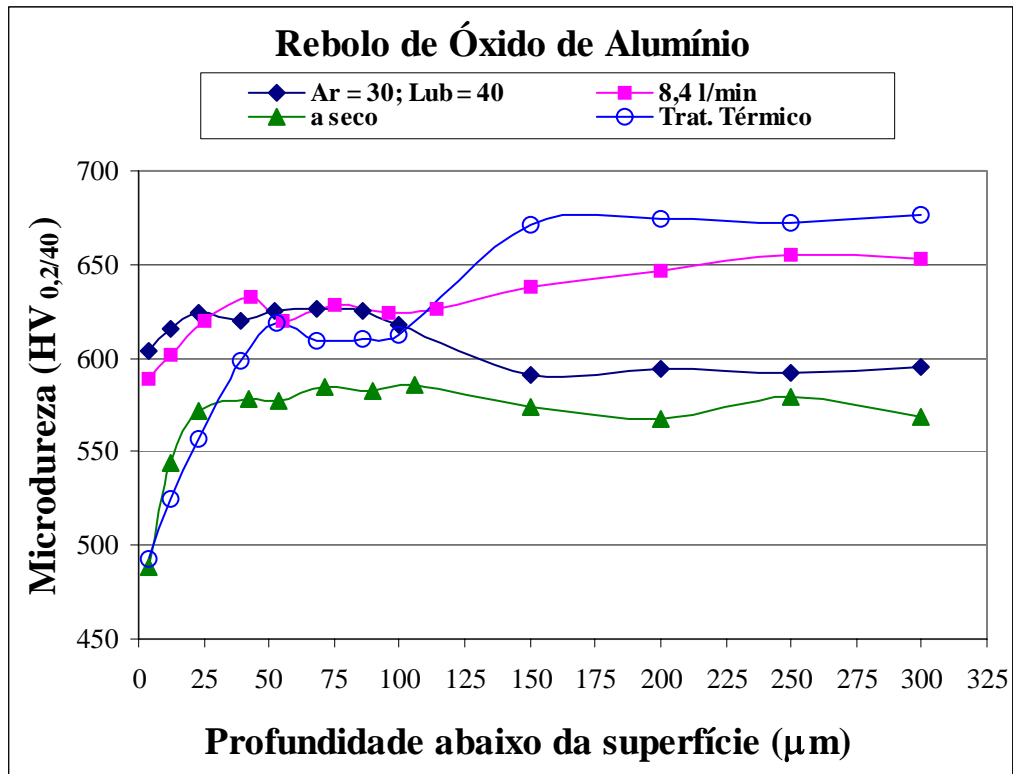


Figura 6.26 - Microdureza para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

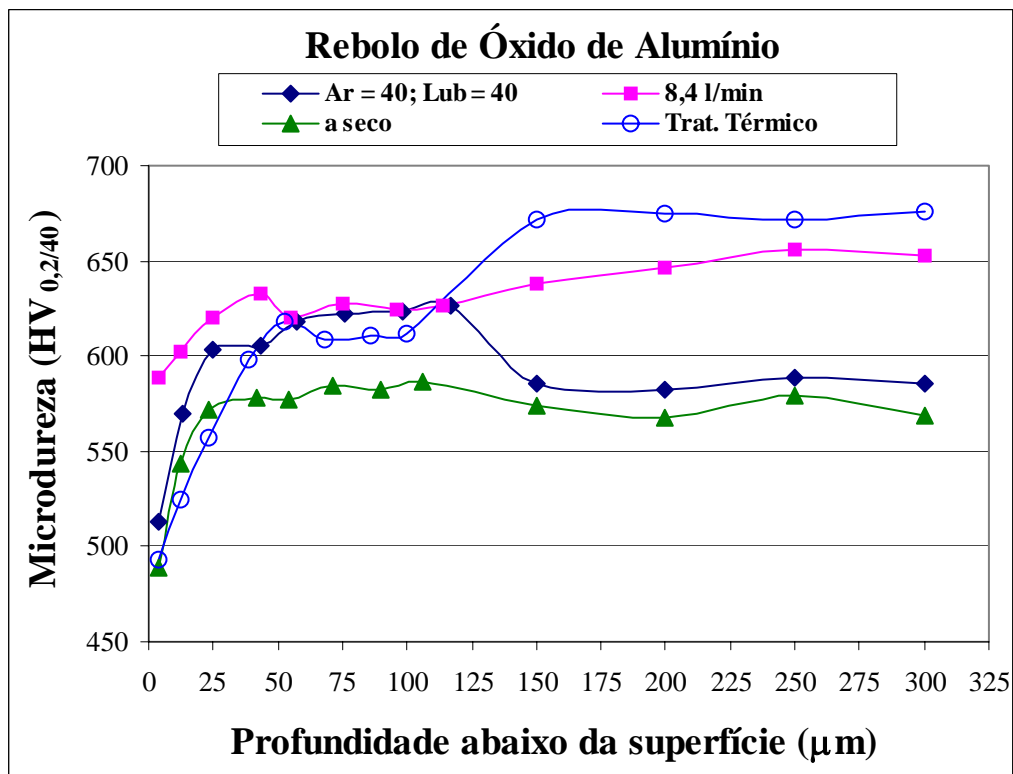


Figura 6.27 - Microdureza para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

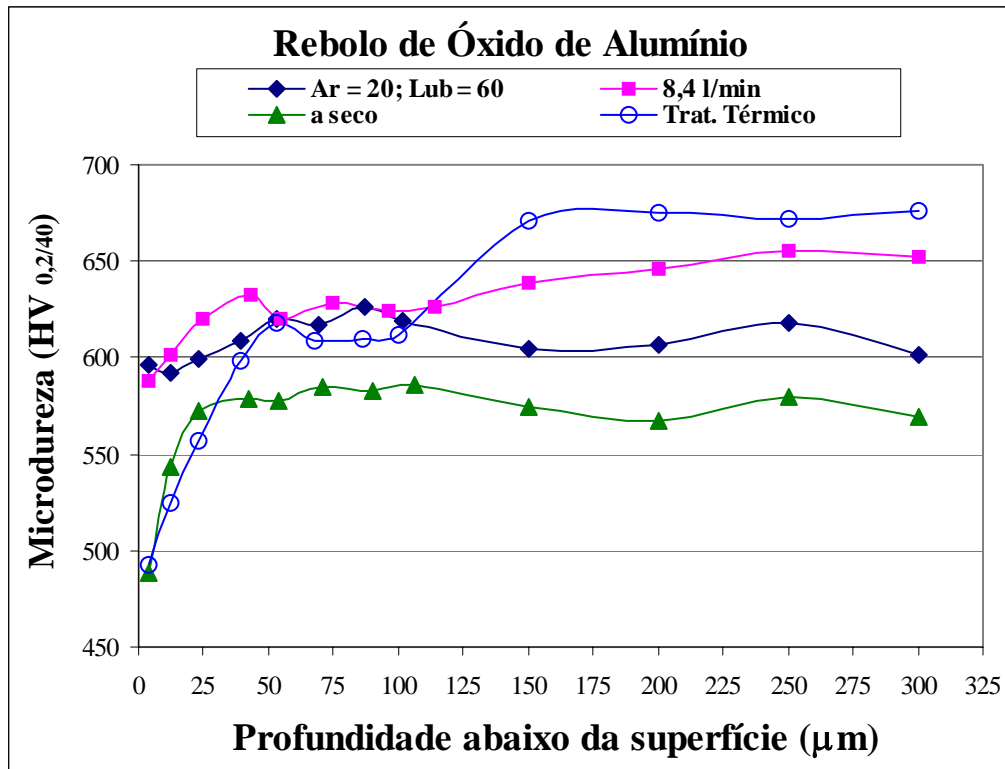


Figura 6.28 - Microdureza para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

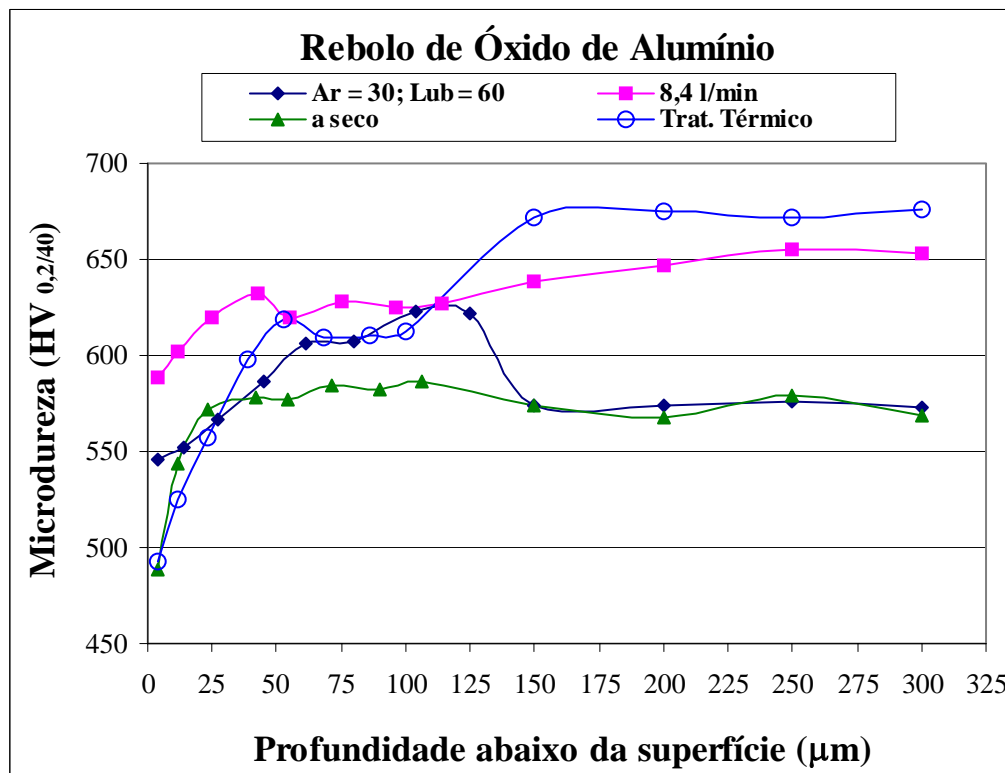


Figura 6.29 - Microdureza para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

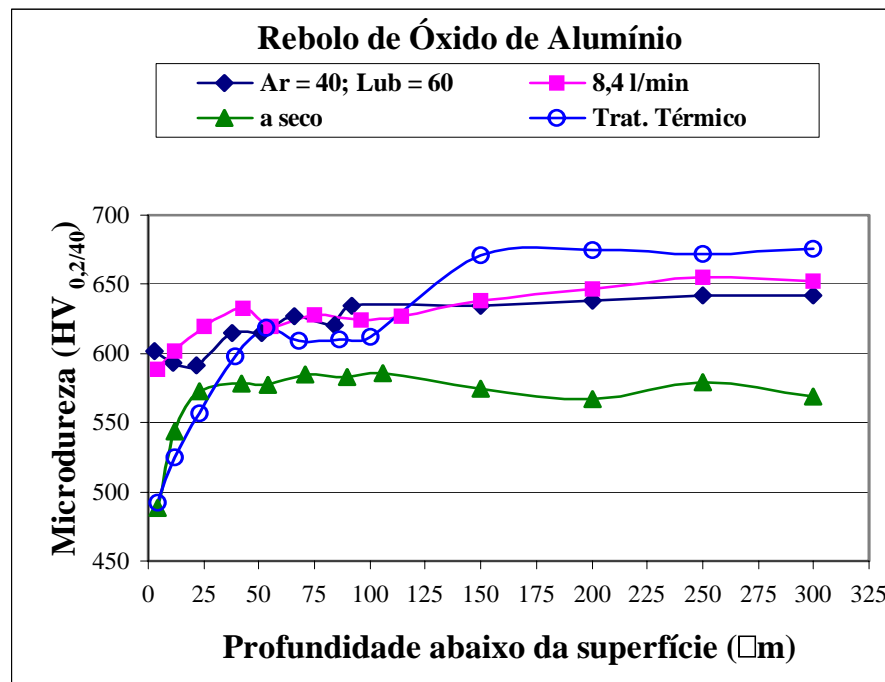


Figura 6.30 - Microdureza para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

6.7.2. Microdureza – Rebolo de CBN

As Figuras 6.31 a 6.33 representam os valores de microdureza obtidos para o rebolo de CBN para análise comparativa entre as condições de lubri-refrigeração convencional (8,4 l/min), aplicação da técnica da MQL e a condição a seco (sem fluido). Para a técnica da MQL foram testadas apenas algumas condições, pois apresentaram em ensaios preliminares resultados insatisfatórios.

Analisando-se os resultados para a microdureza conclui-se que não houveram alterações significativas na microdureza, indicando assim que a técnica da MQL proporcionou boas condições de usinagem. A menor microdureza da peça tratada termicamente se deve ao fato da alta deformação plástica superficial no processo de torneamento, o que acelera o processo de recristalização no tratamento de têmpera, podendo ocasionar um aumento no tamanho de grão da austenita gerando uma estrutura martensítica de menor dureza.

Pode-se concluir por fim que os valores de microdureza para o rebolo de CBN na superfície foram menores quando comparados com o rebolo de óxido de alumínio, provavelmente a alta condutividade térmica do rebolo de CBN contribuiu para este comportamento, evitando que grande parte do calor gerado na retificação fosse dissipado para a peça.

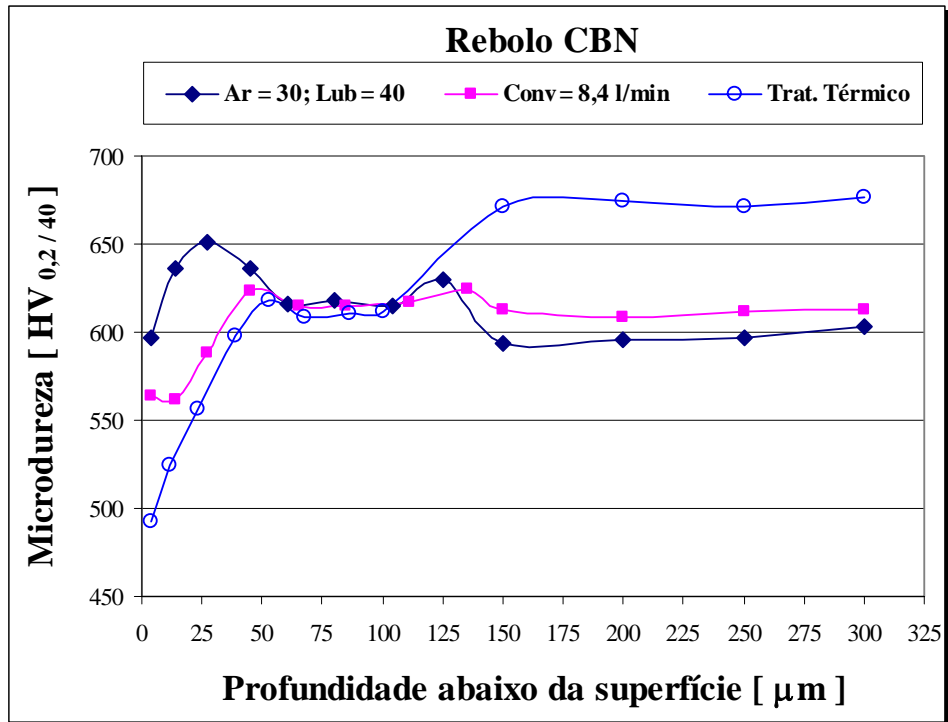


Figura 6.31 - Microdureza para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

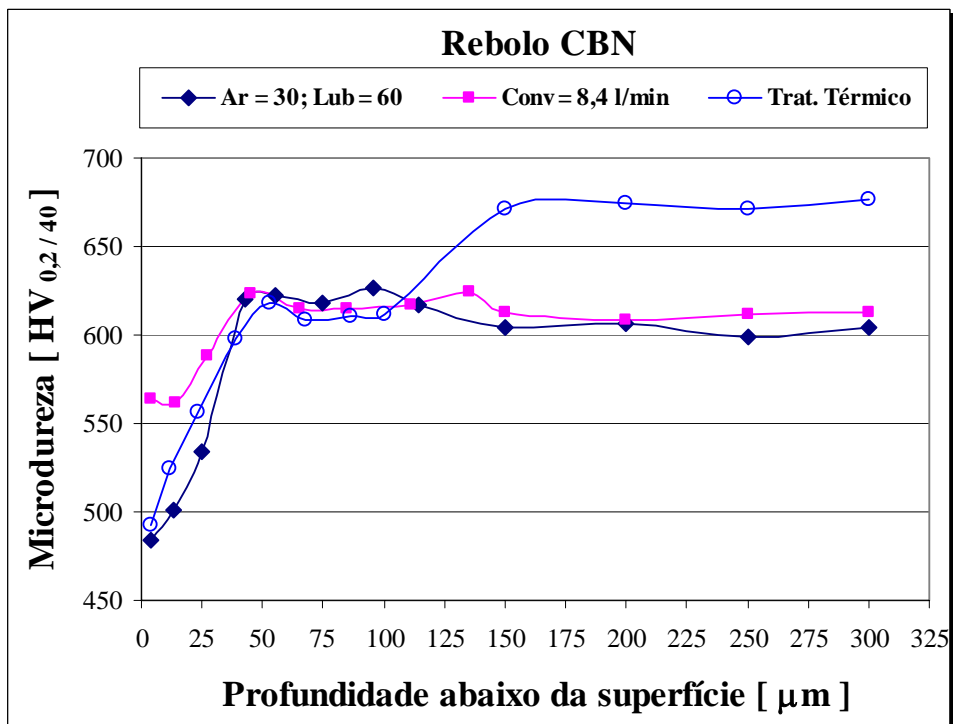


Figura 6.32 - Microdureza para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

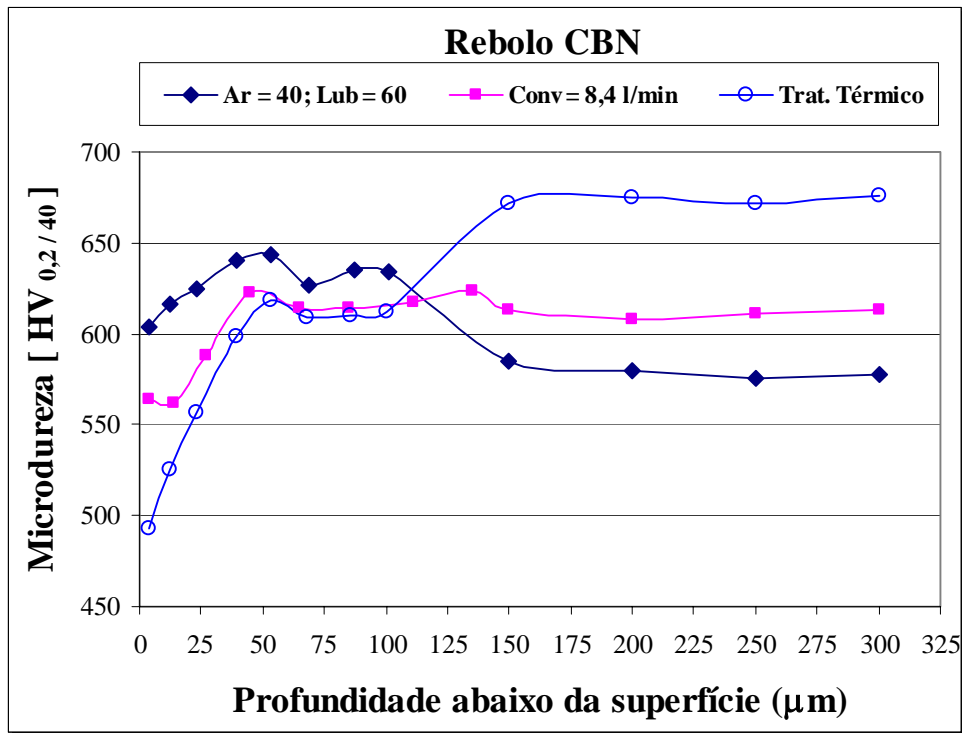


Figura 6.33 - Microdureza para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

6.8. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A integridade superficial de uma peça é de extrema importância, e danos causados a superfície de um material podem afetá-la significativamente, causando alterações na 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 gerada no processo de usinagem, podendo causar danos térmicos na peça.

As Figuras 6.34 a 6.45 representam os resultados obtidos para a microscopia eletrônica de varredura (MEV) obtidos para os rebolos de óxido de alumínio (Al_2O_3) e CBN, para as condições de lubri-refrigeração convencional (8,4 l/min), para a aplicação da técnica da MQL e usinagem a seco. Para a técnica da MQL foram utilizadas duas vazões para o fluido (40 e 60 ml/h) e três velocidades para o ar comprimido (20, 30 e 40 m/s). A ampliação utilizada para todas as análises foi de 4.000 vezes, condição que melhor apresentou a visualização das microestruturas.

A MEV é uma poderosa técnica de avaliação microestrutural, possibilitando análises do estado de superfícies e noção de profundidade.

Analisando-se as microestruturas, verifica-se que o material do corpo de prova, apresenta uma estrutura martensítica. A formação deste tipo de microestrutura esta relacionada a temperatura, velocidade de aquecimento e resfriamento, influenciadas pelo tipo e forma de aplicação do fluido de corte. Observa-se em todas as micrografias que não houveram alterações microestruturais significativas nas diversas condições aplicadas, provavelmente a quantidade de calor gerada no processo absorvida pela peça durante o processo de retificação, não foram suficientes para produzir alterações subsuperficiais. Resultados semelhantes foram encontrados por Klocke et al. (2000a) na retificação externa de mergulho aplicando-se refrigeração com bocal de sapata (24 l/min) e da técnica da MQL (215 ml/h), pois os resultados obtidos não revelaram alterações na microestrutura. Pode-se observar na Figura 6.35, que a condição a seco (sem fluido) apresentou uma estrutura martensítica mais fina, provavelmente devido ao revenimento mais efetivo ocorrido na subsuperfície devido a maior temperatura alcançada e ao resfriamento mais lento.

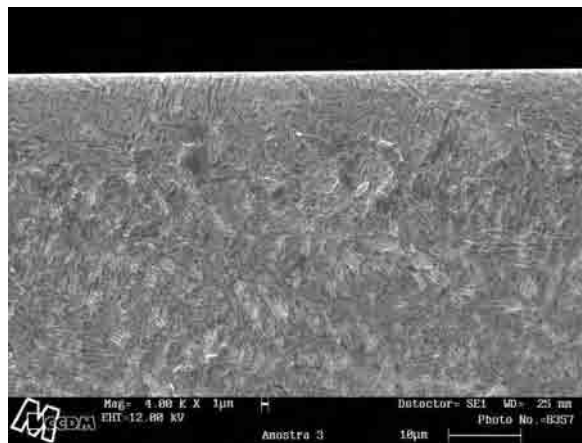


Figura 6.34 - MEV para Rebolo de Óxido, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min

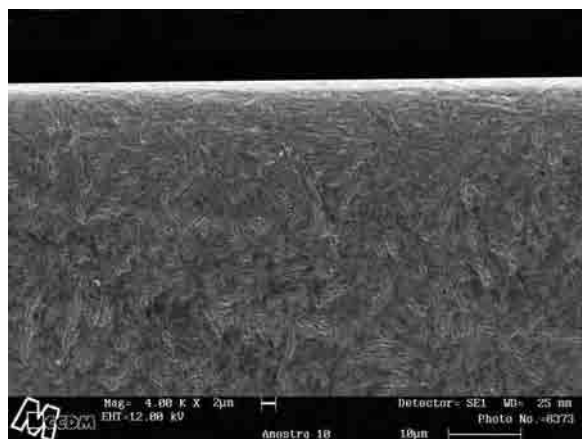


Figura 6.35 - MEV para Rebolo de Óxido, sem refrigeração (a seco)

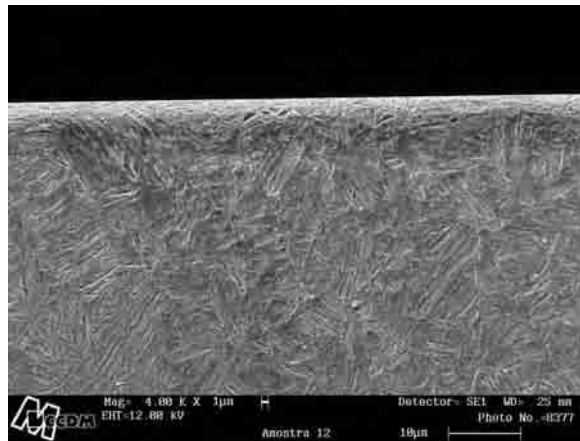


Figura 6.36 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

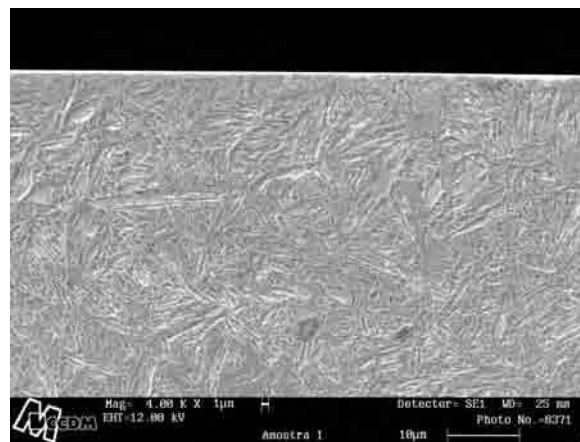


Figura 6.37 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

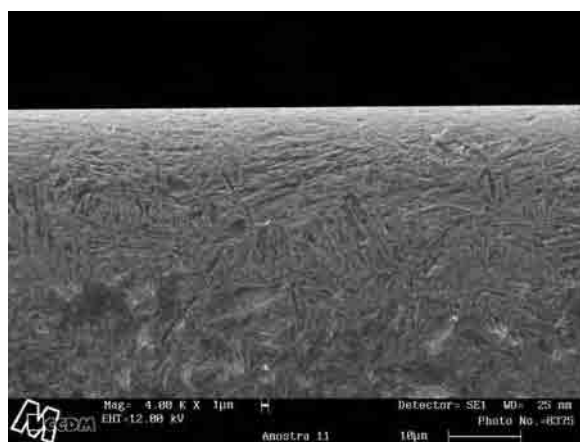


Figura 6.38 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

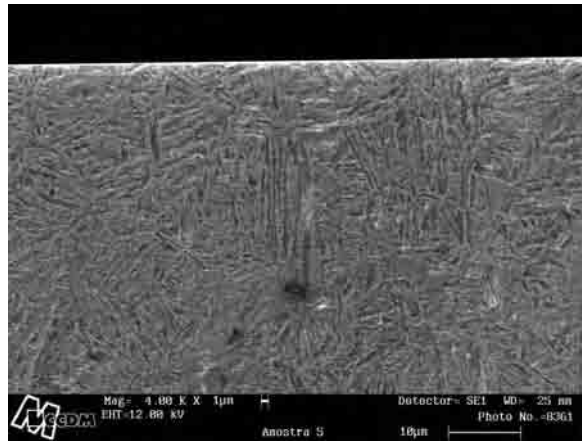


Figura 6.39 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 20 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

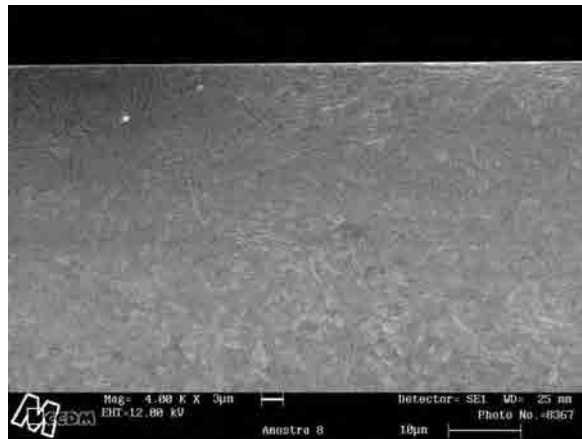


Figura 6.40 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

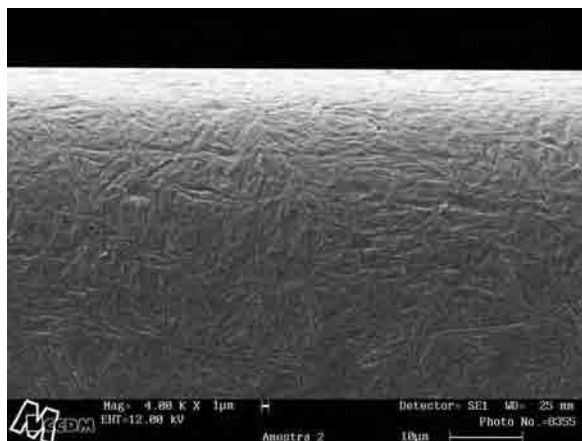


Figura 6.41 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

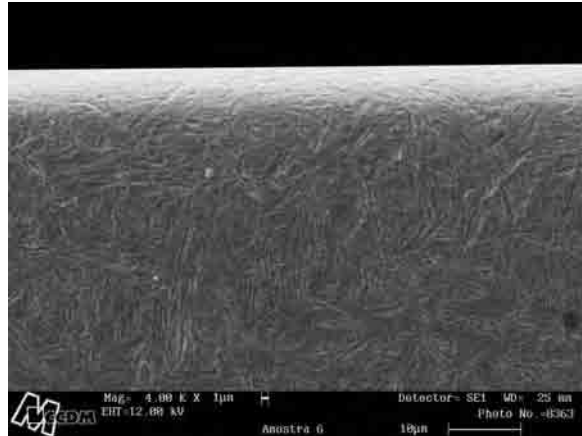


Figura 6.42 - MEV para Rebolo de CBN, Lubri-refrigeração convencional vazão = 8,4 l/min

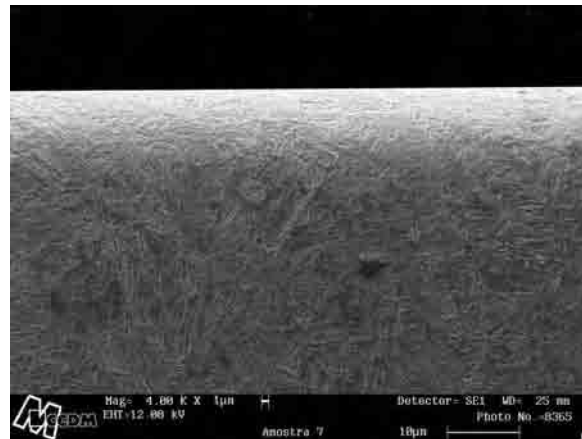


Figura 6.43 - MEV para Rebolo de CBN, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 40 ml/h

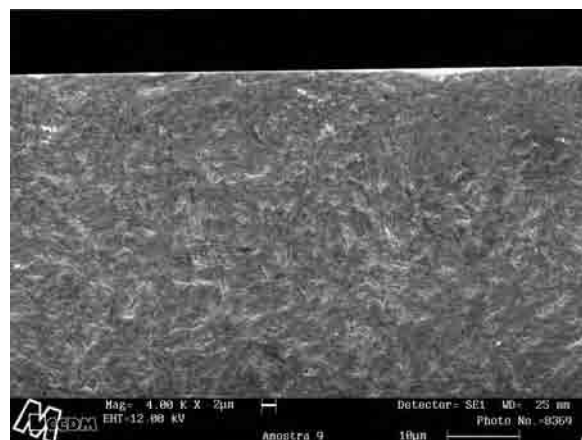


Figura 6.44 - MEV para Rebolo de Óxido, MQL com velocidade do ar = 30 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

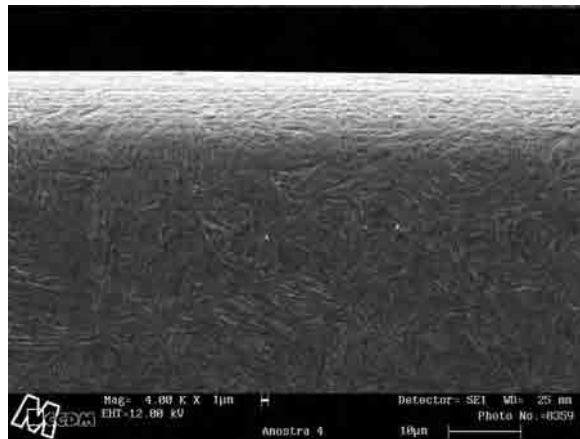


Figura 6.45 - MEV para Rebolo de CBN, MQL com velocidade do ar = 40 m/s e vazão do lubrificante = 60 ml/h

A Figura 6.46 revela a microestrutura para a peça após a operação de torneamento, seguida de tratamento térmico (têmpera e revenimento). Através da análise da microestrutura pode-se afirmar que as diversas condições testadas para a técnica da MQL, 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.

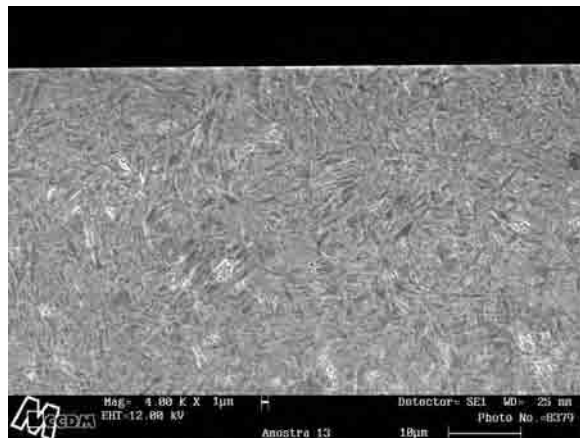


Figura 6.46 - MEV para a peça Torneada e com Tratamento Térmico

7. CONCLUSÕES

Analisando os dados obtidos nos ensaios realizados com o aço ABNT 4340 temperado e revenido, quando da aplicação da lubri-refrigeração convencional, da técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL) e da condição a seco (sem fluido), para os rebolos de CBN e óxido de alumínio pode concluir-se que:

- ✓ A análise geral dos resultados indica que a técnica da MQL demonstrou ser mais eficiente que a lubri-refrigeração convencional;
- ✓ Para o rebole de óxido de alumínio a condição que apresentou os melhores resultados para a técnica da MQL foi com a velocidade de ar igual a 40 m/s e vazão do fluido igual a 60 ml/h;
- ✓ Os valores de tensões residuais obtidos para a técnica da MQL para ambos os rebolos, foram de compressão, o que indica a não alteração das propriedades mecânicas do material. Contudo apresentaram valores maiores para o rebole de CBN devido a sua alta dureza;
- ✓ A técnica da MQL apresentou valores de rugosidade significativamente menores, comprovando assim a eficiência do jato ar/fluido com relação à lubrificação;
- ✓ Analisando a integridade superficial das peças retificadas com a técnica da MQL, com relação a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microdureza, verificou-se que não ocorreram alterações das propriedades do material, devido a eficiência da lubrificação alcançada;
- ✓ Com relação a circularidade nota-se que não ocorrem diferenças significativas entre as técnicas empregadas;
- ✓ A força tangencial de corte sofreu uma redução razoável com a aplicação da técnica da MQL, devido a boa lubrificação proporcionada pela técnica;
- ✓ As condições utilizadas para a técnica da MQL com relação à vazão do fluido e velocidade do ar comprimido não apresentaram dispersão de névoa, possibilitando a boa visualização do processo de retificação por parte do operador e favorecendo a usinagem ambientalmente correta.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a realização de trabalhos futuros a fim de otimizar e melhorar o processo de retificação algumas sugestões podem ser dadas:

- ✓ Analisar o comportamento de aplicação otimizada do fluido de corte com a MQL (Mínima Quantidade de Lubrificação) na retificação de outros tipos de materiais e com diferentes especificações técnicas de rebolos;
- ✓ Verificar se a utilização de defletores aerodinâmicos juntamente com o emprego da técnica da MQL facilita a lubrificação e refrigeração na interface peça-rebolo;
- ✓ Verificar a viabilidade da retificação a seco na retificação.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASM International Handbook Committee, **Metals Handbook**, 6ª edição, Cap. 27, p. 14-20, Maio de 1991.
- BACKER, W.R.; MARSHALL, E.R.; SHAW, M. C. **The Size Effect in Metal Cutting**, Trans. ASME, 74, p.61, 1952.
- BAHETI, U.; GUO, C.; MALKIN, S. **Environmentally-conscious cooling and lubrication for grinding**, In: *Proceedings of the International Seminar on Improving Machine tool Performance*, v. II, July 6-8, San Sebastián, Spain, p.643-654, 1998.
- 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 Máquina & Metais, Aranda Editora, p. 170-197, 2001.
- BRINKSMEIER, E. **A Model for the Development of Residual Stresses in Grinding**, In: NIKU-LARI, A. *Advances in Surface Treatments*. 5.ed. Pergamon Press, vol. 5, p.173-189, 1986.
- BRINKSMEIER, E.; HANNOVER, J. 1.; CAMMIETT, J. T.; KÔNIG, W.; LESKOVAR, P.; PETERS, J.; TÖNSHOFF, H. K. **Residual stresses - Measurement and causes in machining processes**, In: *Annals of the CIRP*, v. 31, n.2, p. 491-510, 1982.
- BROCKHOFF, T; WALTER, A. **Fluid minimization in cutting and grinding**, *Abrasives Magazine*, Oct/Nov, p.38-42, 1998.
- CAMPBELL, J. D. **Optimized Coolant Application**, In: *1st International Machining and Grinding Conference*, MR95-211, *Society of Manufacturing Engineers*, p. 895-904, 12-14 September, Dearborn, Michigan, 1995.
- CARIUS, A. C. **Desenvolvimentos de Produtos e do Mercado de CBN na Europa e na América**, *Revista Máquinas e Metais*, n.403, p.86-103, 1999.
- CARPINETTI, L. C. R. **Planejamento e análise de experimentos**, *EESC -USP*, São Carlos - SP, p.205, 2000.
- DEMETER E. C., HOCKENBERGER M. J. **The application of tool path compensation for the reduction of clamping-induced geometric error**. *International Journal of Production Research*, nº 35, v.12, 1997.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 2ª Edição, p.225-244, 2000.
- DORR, J.; SAHM, A. **A mínima quantidade de lubrificante avaliada pelos usuários**, *Revista Máquinas e Metais*, Novembro, p.20-39, 2000.

DORR, J. **New perspectives in dry machining**. In: *Anais do 4º Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Inovações tecnológicas na manufatura para o ano 2000*, Universidade Metodista de Piracicaba, Unimep, Santa Bárbara d'Oeste, SP, 1999.

DUNLAP, C. **Should you try dry?** *Cutting Tool Engineering*, v.49, n.1, p.22-33, Feb, 1997.

ENGINEER, F.; GUO, C.; MALKIN S., **Experimental Measurement of the Cooling Flow through the Grinding Zone** ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, p.51, 1992.

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

GUO, C.; MALKIN, S. **Analysis of fluid through grinding zone** ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, p.427-434, 1992.

GUO, C.; MALKIN, S. **Analytical and Experimental Investigation of Burnout in Creep-Feed Grinding**, *Annals of the CIRP.*, 43/1, p.283-286, 1994.

GRAF, W. **Cylindrical Grinding**. Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 87p., 2004.

HAFENBRAEDL, D.; MALKIN, S. **Tecnologia ambientalmente correta para retificação cilíndrica interna**, *Revista Máquinas e Metais*, n.426; p.40-55, 2001.

HEISEL, U.; LUTZ, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. **A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte**, *Revista Máquinas e Metais*, n.386, p.22-38, 1998

HITCHINER, M. P. **O emprego da alta velocidade com rebolos de CBN**, *Revista Máquinas e Metais*, setembro, p.116-133, 2001.

HOWES, T.D.; TONSHOFF, H. K.; HEUER, W. **Environmental aspects of grinding fluids**, In: *Annals of the CIRP*, Keynote Paper, v. 40, n.2, p.623-630, 1991.

JAHANMIR, S., STRAKNA T. J. et al **Effect of grinding on strenght and surface integrity of silicon nitride**. *Machining of advanced ceramics Conf. NIST*, p.263-277, 1993.

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

KING, R. I.; HAHN, R. 5. **Handbook of modern grinding technology**, 3ª ed., Cap.6, p.119-167, 1992.

KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G. **Dry cutting**, In: *Annals of the CIRP*, 46, n.2, p.519-526, 1997.

KLOCKE, F.; SCHULZ, A.; GERSCHWILER, K.; REHSE, M. **Clean manufacturing technologies - The competitive edge of tomorrow?** *The International Journal of Manufacturing Science & Production*. v.1, n.2, p.77-86, 1998.

KLOCKE, F.; BECK, T.; EISENBLATTER, O.; FRITSCH, R.; LUNG, D.; PÖHLS, M. **Applications of minimal quantity lubrication (MQL) in cutting and grinding**, In: *Proceeding of the 12th International Colloquium Industrial and Automotive Lubrification*, Technische Akademie, Esslingen, , 2000.

KOHLI S.P., GUO, C.; MALKIN, S. **Energy partition to the workpiece for grinding with aluminum oxide and CBN abrasive Wheels**, *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.117, p.160-168, 1995.

KOVACEVIC, R; MOHAN R. **Effect of high speed grinding fluid on surface grinding performance**. SME Technical paper MR95-213, p.919-931, 1995.

KRISHNAN, N.; GUO, C.; MALKIN, S. **Fluid Flow Through the Grinding Zone in Creep-Feed Grinding** Proceedings of the 1st International Machining and Grinding Conference, SME, 1995.

LAVINE, A.S., MALKIN, S.; IEN, T. C. **Thermal aspects of grinding with CBN wheels**, In: *Annals of the CIRP*, v.38, n.1, p.557-560, 1989.

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. **Current Trends in CBN Grinding Technology**, In: *Annals of the CIRP*, v.34, n.1, p.557-560, 1985.

MALKIN, S. **Grinding mechanisms e grinding temperatures and thermal damage**, In: *Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives*. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, Cap. 5 e 6, p.108-171, 1989.

MAYER, J. E. e FANG G. P. **Diamond grinding of silicon nitride ceramic**. Machining of advanced ceramics Conf. NIST, , p.171-183, 1993.

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

MARSHALL, E. R.; SHAW, M. C. **Forces in Dry Surface Grinding**, *Trans. ASME*, 74, p.51, 1952.

MINKE, E. **Contribution to the role of coolants on grinding process and work results**. In: *3rd International Machining & Grinding Conference*, October 4–7, Cincinnati, Ohio, p. 13-32, 1999.

- MONICI, R. D. **Análise da mínima quantidade de refrigeração e da refrigeração convencional no processo de retificação em aços endurecidos.** Dissertação de Mestrado - UNESP, Bauru, SP, Brasil, 2003.
- MOTTA, M. F., MACHADO A. R. **Fluidos de corte: tipos, funções, seleção, métodos de aplicação e manutenção.** Revista Máquinas e Metais, p. 44-56, 1995.
- NOVASKI, O.; DÖRR, J. **Usinagem sem refrigeração,** *Revista Máquinas e Metais;* n.399, Março, p.18-27, 1999.
- NUSSBAUM, O. H. C. **Rebolos e abrasivos - Tecnologia básica,** *Ícone editora Ltda.,* 1988.
- OLIVEIRA, J. F. O. **Tópicos avançados sobre o processo de retificação,** *Reimpressão* em setembro 1998.
- OLIVEIRA, J. F. G. **Análise da ação do macroefeito de dressagem de rebolos no desempenho do processo de retificação.** Tese (Doutorado) - USP, São Carlos, SP, Brasil, 272 p., 1988.
- PARK, C.W., KIM, D.E., LEE, S.J., **Shape prediction during the cylindrical traverse grinding of a slender workpiece** *Journal of Materials Processing Technology* 88, p.23-32, 1997.
- RUNGE, P. R. F., DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas indústrias – Produção, manutenção e controle** *Triboconcept – Edições Técnicas,* 1990, p. 71-171, 1990.
- SAHM, D.; SCHNEIDER, T. **A produção sem refrigerante é interessante e deve ser mais conhecida,** *Revista Máquinas e Metais,* n.367, p.38-55, 1996.
- SCHULZ, H. **Trends in manufacturing technology at the threshold of the millennium.** In: *Anais do 4^o Seminário Internacional de Alta Tecnologia -Inovações tecnológicas na manufatura para o ano 2000,* Universidade Metodista de Piracicaba, Unimep, Santa Bárbara d'Oeste, 1999.
- SCHWARZ, J. **O ótimo superacabamento começa pelo acabamento certo,** *Revista Máquinas e Metais,* Dezembro, p.126-133, 1999.
- SHAW, M. C. **Heat-affected zones in grinding Steel,** In: *Annals of the CIRP,* v.43, n.1, p.279-282, 1994.
- SHAFTO, G. R.; HOWSE, T. D.; ANDREW, C. **Thermal Aspects of Creep-Feed Grinding** *Proceedings of the 16th International Machine Tool Design Research Conference,* Manchester, Inglaterra, 1975.
- SILVA, L. R. (2002). **Estudo da geometria da aresta de corte de ferramentas aplicadas ao torneamento de superligas à base de níquel com alta velocidade de corte,** *Tese de Doutorado apresentada à Universidade de São Paulo,* 2002.

SILVA, L. R. **Análise do comportamento da mínima quantidade de lubrificante – MQL no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho utilizando rebolos convencionais e superabrasivos**, Tese Pós-Doutorado apresentada a Universidade Estadual Paulista – Bauru-SP, 2004.

SIMON, T. A. **O estágio atual da tecnologia das máquinas-ferramentas** Revista Máquinas e Metais, p.88-108, 1999.

TAWAKOLI, T. **Minimum coolant lubrication in grinding**, *Industrial Diamond Review*, n.1, p.60-65, 2003.

TÖNSHOFF, H. K.; GRABNER, T. **Cylindrical and Profile Grinding with Boron Nitride Wheels** Proceedings of the 5th International Conference on Production Engineering, Tokyo, p.326-343, 1984.

UEDA, T.; TANAKA, H. **Measurement of Grinding Temperature of Active Grains Using Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fiber**, *Annals of the CIRP.*, 42/1, p.405-408, 1993.

UEDA, T.; SAIO, M; SUGITA, I.; NAKAYAMA, K. **Thermal behavior of cutting grain in grinding**, In: *Annals of the CIRP*, v.44, n.1, p.325-328, 1995.

VANSEVENANT, I. E. **An improved mathematical model to predict residual stresses in surface plunge grinding**, In: *Annals of the CJRP*, v.36, n.1, p.413-416, 1989.

WEBSTER, J., **Selection of coolant type and application technique in grinding**. Supergrind, p.205-218, 1995.

WEBSTER, J. A.; CIU, C. **Flow rate and jet velocity determination for design of a grinding cooling system**, In: *1 International Machining & Grinding conference*, Dearborn, MI, 1995.

WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R. B., TEIXEIRA, C. R. **Aspectos ecológicos nos processos de usinagem - Revisão**, In: *VI Congreso Iberoamericano de Ingenieria Mecanica - CIDIM 99*, 23 a 26 de Noviembre, Santiago, Chile, 1999.

WEINGAERTNER, W. L., IABORGA, A. R. M., IABORGA, J. D. M. (). **Análise dos danos técnicos na retificação**, In: *XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Uberlândia, MG, 2001.

YOUNG, P.; BYRNE, O.; COTTERELL, M. **Manufacturing and the environment**, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.13, p. 488-493, 1997.