



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS
Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES

**INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO NA RETIFICAÇÃO
DO AÇO ABNT 4340 USANDO REBOLO DE CBN.**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências do *campus* de Bauru, Universidade Estadual Paulista para a obtenção do título de Doutor em Ciência e Tecnologia de Materiais, área de Processamento de Materiais.

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

Bauru
2007



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS
Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES

**INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO NA RETIFICAÇÃO
DO AÇO ABNT 4340 USANDO REBOLO DE CBN.**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências do *campus* de Bauru, Universidade Estadual Paulista para a obtenção do título de Doutor em Ciência e Tecnologia de Materiais, área de Processamento de Materiais.

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

Bauru
2007

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DO(A) FACULDADE DE CIENCIAS DE BAURU.

Aos 19 dias do mês de outubro do ano de 2007, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Pós-graduação/FC, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CARLOS ALBERTO FORTULAN do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Escola de Engenharia de São Carlos-Usp, Prof. Dr. MARCOS TADEU TIBURCIO GONCALVES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. AMAURI HASSUI do(a) Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos / Universidade de São Paulo, Prof. Dr. JAIME GILBERTO DUDUCH do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Escola de Engenharia de São Carlos-Usp, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES, intitulado "Influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN". Após a exposição, o discente foi argüido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR



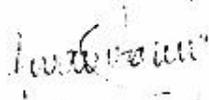
Prof. Dr. CARLOS ALBERTO FORTULAN



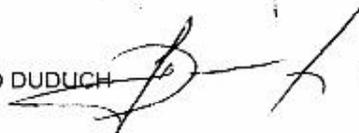
Prof. Dr. MARCOS TADEU TIBURCIO GONCALVES



Prof. Dr. AMAURI HASSUI



Prof. Dr. JAIME GILBERTO DUDUCH



**DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - BAURU**

Alves, Manoel Cléber de Sampaio.

Influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN / Manoel Cléber de Sampaio Alves, 2007.
175 f. il.

Orientador : Paulo Roberto de Aguiar.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2007.

1. Fluidos de corte. 2. Rebolos. 3. Rebolo de CBN. 4. Retificação e polimento. 5. MQL. I - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências. II - Título.

DEDICATÓRIA

À minha mãe Maria Aparecida de Sampaio Alves e ao meu saudoso pai José Leopoldino Alves que apesar de inúmeras dificuldades, sabiam que o caminho para o sucesso de seus filhos era através da educação. Dedico ainda a minha esposa Cristiane Alves e ao meu filho Enzo Gabriel que são a razão da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial à minha esposa Cristiane Alves por entender minha ausência grande parte do tempo de realização desta pesquisa e por sempre me apoiar.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar e ao meu co-orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pelo constante auxílio, paciência, amizade e pela confiança em meu potencial.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela concessão do auxílio à pesquisa, que foi de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho.

À Empresa Shell do Brasil S.A. pela doação dos fluidos de corte e pelo importante suporte técnico fornecido.

À Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista - *campus* de Bauru, por gentilmente ceder os Laboratórios de Usinagem por Abrasão e de Materiais para a elaboração deste trabalho.

Aos docentes do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP de Bauru, que contribuíram para a realização desta pesquisa, quer seja com sugestões, quer com conselhos, principalmente aos Professores Doutores Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez, Luiz Daré Neto, Ivaldo De Domenico Valarelli, João Eduardo Guarnetti dos Santos.

A todos os docentes do curso de Engenharia Industrial Madeireira da UNESP de Itapeva, em especial aos docentes Prof. Dr. Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, Prof. Dr. Guilherme Corrêa Stamato, Prof. M.Sc. Alexandre Jorge Duarte de Souza, Prof. Dr. Guilherme, Profa. Dra. Maria Angélica Martins Costa, Prof. Dr. José Cláudio Caraschi, Prof. Dr. Marcelo Takeshi Yamashita, Prof. Dr. Cláudio De Conti, Prof. Dr. Natal Nerímio Regone, Prof. Dr. Carlos Alberto Oliveira de Matos, Prof. Dr. Ricardo Anselmo Malinovski, Prof. Dr. Gustavo Ventorim, Prof. Dr. Ricardo Marques Barreiros e a Profa. Dra. Cristiane Inácio de Campos pelo grato convívio e ajuda dispensada a mim.

Agradeço também à Faculdade de Ciências da Universidade Estadual Paulista – UNESP, em especial ao programa de Pós-graduação em Programa em Ciência e Tecnologia de Materiais pela oportunidade que me foi concedida. Agradeço também em especial aos docentes Prof. Dr. Paulo Noronha Lisboa Filho, Prof. Dr. Carlos Roberto Grandini, Profa. Dra. Margarida Juri Saeki, Prof. Dr. José Humberto Dias da Silva, Prof. Dr. Luis Vicente de Andrade Scalvi, Prof. Dr. Carlos José Leopoldo Constantino, Prof. Dr. José Alberto Giacometti pela colaboração na minha formação e neste trabalho.

Aos Mestres Humberto Fujita, Ulysses de Barros Fernandes, Rodrigo Daun Monici e Sidney Domingues os quais colaboraram com amizade e informações úteis a este trabalho.

Aos alunos de graduação em Engenharia Mecânica da UNESP de Bauru, Gustavo Michelli, Marcos Hiroshi Oikawa, Gabriel Cuoco, Rodrigo Santana Destro, que foram de grande importância no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos técnicos Hamilton José de Mello do Laboratório de Materiais, Rodrigo e Cristiano do Laboratório de Usinagem por Abrasão, Osmar Luis Martinelli do Laboratório de Engenharia Elétrica, Carlos Roberto Furlanetto do Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado, todos da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista - *campus* de Bauru, por gentilmente colaborarem neste projeto.

Quero agradecer à minha família, em especial a minha mãe Maria Aparecida de Sampaio Alves e ao meu saudoso pai José Leopoldino Alves, pela determinação e empenho no sonho de propiciar formação educacional aos filhos.

Agradeço especialmente a *Deus* por ter me concedido saúde, disposição e capacidade para a realização desta pesquisa científica.

*“Por que nos contentarmos em viver rastejando,
quando sentimos o desejo de voar?”*

(Hellen Keller)

Alves, M.C.S. *Influência dos Métodos de Lubri-Refrigeração na Retificação do Aço ABNT 4340 Usando Rebolo de CBN*. 2007. 175p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Área de Processamento de Materiais) – Faculdade de Ciências do *campus* de Bauru, UNESP, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2007.

RESUMO

É analisada a influência das técnicas de mínima quantidade de lubrificante (MQL), refrigeração otimizada e refrigeração convencional, com diferentes vazões e velocidade de aplicação do fluido de corte, na qualidade das peças produzidas (acabamento, erros de forma, trincas, queima, perda da dureza) com aços endurecidos, no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho com a utilização de rebolos superabrasivos com baixa concentração de CBN. Utilizou-se fluidos de corte de origem vegetal, que representam menos riscos à saúde e ao meio. A análise da qualidade das peças foi realizada através da avaliação das variáveis de saída do processo como o comportamento da força tangencial de corte, energia específica de retificação, rugosidade, desvio de circularidade, emissão acústica, tensão residual, análise de microscopias eletrônicas de varredura e microdureza. Com a análise das formas de aplicação e das várias vazões e velocidades do fluido de corte utilizadas encontraram-se condições de lubri-refrigeração que propiciam a diminuição do volume de fluido de corte, diminuição do tempo de usinagem sem prejudicar os parâmetros geométricos, dimensionais, o acabamento superficial e a integridade superficial dos componentes. Em relação as diferentes formas de aplicação do fluido de corte notou-se o melhor desempenho da aplicação otimizada para maiores velocidades mostrando a eficiência de um novo conceito de bocal utilizado. O processo otimizado e o processo MQL foram capazes de manter a dureza superficial e a integridade superficial das peças produzidas. Exceção somente para a condição MQL com vazão de fluido de corte de 40ml/h que produziu trincas e retêmpera superficial. O desvio de circularidade e a rugosidade proporcionada pelos métodos estão dentro de valores recomendados para a retificação sendo que a técnica otimizada apresentou melhores resultados (2 μ m para o desvio de circularidade e 0,5 μ m para rugosidade Ra) comparado com a técnica MQL (6,8 μ m para o desvio de circularidade e 1,2 μ m para rugosidade Ra). O processo de mínima quantidade de lubrificação apresentou melhor desempenho para maiores vazões de fluido de corte mostrando-se capaz de ser empregado em retificação, pois atendeu as exigências qualitativas, com a vantagem de se utilizar pouquíssimo fluido de corte (até 100ml/h). Rebolos com baixa concentração de CBN, conseqüentemente mais baratos,

proporcionaram bons resultados quando associados com técnicas mais eficientes de aplicação de fluido de corte apresentando desgaste reduzido.

Palavras-chaves: Retificação, rebolo de CBN, fluido de corte, mínima quantidade de lubrificante (MQL), lubrificação convencional, lubrificação otimizada.

ABSTRACT

The influences on surface integrity of the parts (finishing, geometrical errors, cracks, burn, microhardness) and grinding wheel (wear) have been analyzed in this research by employing the minimum quantity of lubrication (MQL), optimized and conventional cooling for hardened parts of steel and superabrasives grinding wheel in the cylindrical plunge grinding process. This study was carried out through the assessment of the process output variables such as the behavior of the tangential cutting force, specific energy, surface roughness, circularity errors, acoustic emission, residual stress, scanning electronic microscopy (SEM) and microhardness. The cutting fluid derived from vegetal oil has been utilized in order to comply with the environmental requirements and thus offering less risk to the health. It could be observed from the analysis on different ways of cutting fluid applications that there are cooling conditions which facilitate the decrease in cutting fluid volume, decrease in grinding time without impairing the geometrical and dimensional parameters, the surface finish and surface integrity of the parts. It could be noted the optimized application for higher velocities has presented the best performance regarding the different applications of cutting fluids. The optimized and MQL processes were able to maintain the hardness and surface integrity of the ground parts. Exception occurred only for MQL condition with flow rate of 40ml/h, which led to cracks and quench on the workpiece surface. Roundness errors and surface roughness are within recommended values for grinding with the best results obtained for the optimized method (2 μ m for roundness error and 0.5 μ m for surface roughness) compared with the MQL technique (6.8 μ m for roundness error and 1.2 μ m for surface roughness). The process of minimum quantity of lubrication, however, has showed possible to be used in the grinding process because it has satisfied the qualitative requirement a workpiece is meant to have, besides taking advantage of using a very small amount of cutting fluid (up to 100ml/h). Grinding wheels with low CBN concentration, thus cheaper, provide good results when associated with more efficient techniques of cutting fluid application which, in turn, show reduced wear.

Key words: Grinding process, CBN grinding wheel, cutting fluid, minimum quantity of lubrication (MQL), optimized cooling, conventional cooling,

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
SUMÁRIO.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. RETIFICAÇÃO	4
2.1.1. Retificação cilíndrica externa de mergulho.....	5
2.1.1.1. Parâmetros de Caracterização.....	6
2.1.1.1.1. Arco ou Comprimento de Contato (l_c).....	6
2.1.1.1.2. Diâmetro Equivalente (d_e)	6
2.1.1.1.3. Espessura de Corte Equivalente (h_{eq})	7
2.1.1.2. Parâmetros de corte envolvidos na retificação	7
2.1.1.2.1 Profundidade de corte (a).....	7
2.1.1.2.2 Velocidade de mergulho (V_f).....	8
2.1.1.2.3 Velocidade de corte (V_s).....	8
2.1.1.2.4 Velocidade da peça (V_w)	9
2.1.2. Variáveis envolvidas no processo de retificação.....	9
2.1.2.1 Força tangencial de corte (F_{tc}) e energia específica de retificação (u).....	9
2.1.2.2. Desgaste diametral do rebolo e relação G	10
2.1.2.3. Rugosidade das Peças Retificadas	11
2.1.2.4. Emissão Acústica	12
2.1.2.5. Desvio de Circularidade	13
2.1.2.6. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	13
2.1.2.7. Microdureza.....	14
2.1.3. Mecanismos de Formação do Cavaco	15
2.1.4. Danos Térmicos.....	17
2.2. REBOLOS	19
2.2.1. Características dos Rebolos.....	19
2.2.2. Rebolos de CBN	25
2.3. FLUIDOS DE CORTE.....	28
2.4. MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO NA RETIFICAÇÃO ...	31
2.5. A TÉCNICA DA REFRIGERAÇÃO OTIMIZADA.....	34
2.6. ESTUDOS QUANTO A FORMAS DE APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE E QUANTO A UTILIZAÇÃO DE CBN.	36

3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1 PARÂMETROS DE ENTRADA	38
3.1.1 Fluidos de corte	38
3.1.2 Controle dos fluidos de corte	39
3.1.3 Ferramenta de corte	40
3.1.4 Métodos utilizados para aplicação de fluido de corte.....	41
3.1.4.1 Método convencional	41
3.1.4.2 Método da mínima quantidade de lubrificação (MQL)	42
3.1.4.3 Método Otimizado	48
3.1.4.4. Sistema de regulação de vazão para sistema otimizado e convencional	51
3.1.5. Parâmetros de corte.....	52
3.2 VARIÁVEIS DE SAÍDA DO PROCESSO	54
3.3 PROCEDIMENTOS INICIAIS	54
3.3.1 Confeção dos corpos de prova.....	54
3.3.2 Dressagem dos rebolos	58
3.3.3 Preparação dos fluidos de corte.....	59
3.3.4 Classificação dos ensaios	59
3.3.4.1 Seqüência de ensaios.....	60
3.4. PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PARA MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS MONITORADAS EM TEMPO REAL	63
3.4.1. Aquisição da força tangencial de corte e energia específica de retificação	63
3.4.2. Emissão acústica.....	68
3.4.3. Programa de aquisição de dados.....	69
3.4.4. Banco de ensaios	70
3.5. PREPARARAÇÃO DO BANCO DE ENSAIOS.....	71
3.5.1. Balanceamento do rebolo de CBN	71
3.5.2. Limpeza do reservatório usado para o método convencional e método otimizado	72
3.5.3. Elaboração de suporte para o Sensor de Emissão acústica	72
3.6. PROCEDIMENTOS REALIZADOS ANTES DE CADA ENSAIO	73
3.7. PROCEDIMENTOS EFETUADOS DURANTE A RETIFICAÇÃO.....	74
3.8 MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA NÃO OBTIDAS EM TEMPO REAL ..	76
3.8.1 Medição da rugosidade	76
3.8.2 Desgaste diametral do rebolo	77
3.8.3 Medição dos desvios de circularidade	78
3.8.4 Preparação das amostras para análise de Tensão residual, MEV e microdureza	79
3.8.4.1 Tensão residual	80
3.8.5 Análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura.....	82
3.8.6. Microdureza	85
3.8.6.1. Ensaio de Microdureza realizados.....	85
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
4.1. FORÇA TANGENCIAL DE CORTE.....	87

4.1.1. Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada nas forças tangenciais de corte.....	87
4.1.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL e MC nas forças tangenciais de corte.....	89
4.1.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte nas forças tangenciais de corte.	91
4.2. ENERGIA ESPECÍFICA DE RETIFICAÇÃO.....	94
4.2.1 Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na energia específica de retificação.....	94
4.2.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na energia específica de retificação.	95
4.2.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na tensão residual na energia específica de retificação.	97
4.3. EMISSÃO ACÚSTICA.....	98
4.3.1 Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na emissão acústica	99
4.3.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na emissão acústica	100
4.3.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na emissão acústica	102
4.4. RUGOSIDADE.....	105
4.4.1. Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na rugosidade	106
4.4.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na rugosidade.....	107
4.4.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na rugosidade	108
4.5. DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO DE CBN.....	110
4.5.1. Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada no desgaste diametral do rebole de CBN	110
4.5.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL e método convencional no desgaste diametral do rebole de CBN	111
4.5.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte no desgaste diametral do rebole de CBN.....	113
4.6. DESVIOS DE CIRCULARIDADE	114
4.6.1. Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada no desvio de circularidade	114
4.6.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL no desvio de circularidade.....	115
4.6.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte nos desvios de circularidade.....	116
4.7. MICRODUREZA.....	117
4.7.1. Resultados para Microdureza Vickers (HV)	118
4.7.1.1. Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na microdureza (escala Vickers).....	118

4.7.1.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na Microdureza (escala Vickers)	119
4.7.1.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na Microdureza (escala Vickers)	121
4.7.2. Resultados para Microdureza Knoop (HK).....	122
4.7.2.1. Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na microdureza (escala Knoop)	122
4.7.2.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na Microdureza (escala Knoop).....	123
4.7.2.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na Microdureza (escala Knoop).....	124
4.8. TENSÃO RESIDUAL.....	126
4.8.1. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na tensão residual.....	126
4.8.2. Influência da velocidade de aplicação do fluido no sistema otimizado na tensão residual.	127
4.8.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na tensão residual.	128
4.9. ANÁLISE MICROESTRUTURAL POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	129
4.9.1. Características de uma peça onde a integridade superficial esta mantida	130
4.9.2. Influência da falta de lubrificante na integridade superficial através de MEV.....	131
4.9.3. Influência da aplicação convencional de fluido de na integridade superficial através de MEV	133
4.9.4. Influência da velocidade de aplicação do fluido de corte utilizando lubri-refrigeração otimizada na integridade superficial através de MEV	134
4.9.5. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na integridade superficial através de MEV.	138
5. CONCLUSÕES	142
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN, 1989, adaptada). ___	5
Figura 2.2 – a) Base quadrada; b) Angulação; c) Indentação Vickers. (FERREIRA, 2004) _____	14
Figura 2.3 – a) Desenho esquemático; b) Indentação Knoop (FERREIRA, 2004). _____	15
Figura 2.4 – Formação do cavaco por um grão abrasivo, (KÖNIG,1980 e MALKIN, 1989, adaptada) _____	17
Figura 2.5 – Mecanismos de desgaste do rebolo: A – desgaste por atrito, B – fratura do grão abrasivo e C – fratura do aglomerante devido ao desgaste (MALKIN, 1989). _____	21
Figura 2.6 – Caracterização de um processo de dressagem, contato rebolo/dressador e principais parâmetros envolvidos no processo (OLIVEIRA, 1988 - adaptada) _____	23
Figura 2.7 – a) Dressador tipo Fliese utilizado nesta pesquisa. Fabricante: Master Diamond. b) Dressador tipo ponta única(STEMMER, 1992) _____	24
Figura 2.8 – Diagrama Esquemático de um Sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação (HEISEL et al., 1998, adaptada). _____	34
Figura 2.9– (a) Modelo proposto por Webster et al. (b) Modelo tradicional de bocal. _____	35
Figura 3.1 – Sistema convencional para aplicação de fluido de corte, com dois bicos difusores em operação. _____	41
Figura 3.2 – Detalhes construtivos do aplicador ITW Accu-lube 79053D _____	42
Figura 3.3 – Esquema de montagem da linha de ar comprimido _____	43
Figura 3.4 – Circuito hidro-pneumático do Sistema MQL utilizado. _____	43
Figura 3.5 – Vistas do bocal utilizado na experimentação com MQL. _____	44
Figura 3.6 – Vista da parte traseira do bocal MQL mostrando os orifícios de entrada de ar comprimido e fluido de corte. _____	44
Figura 3.7 – Desenho do bocal MQL. _____	46
Figura 3.8 – Vista do bocal utilizado na experimentação com MQL instalado na Retificadora mostrando a ligação de ar comprimido. _____	45
Figura 3.9 – Sistema para a medição da vazão de fluido de corte no sistema MQL. _____	47
Figura 3.10 – Ensaio com sistema MQL. _____	48
Figura 3.11 – Desenho do bocal Otimizado construído. _____	49
Figura 3.12 – Formação do jato de fluido de corte com o Bocal Otimizado. _____	50
Figura 3.13– Formação do jato de fluido de corte com o Bocal Otimizado (vista lateral). _____	51
Figura 3.14 – Medidor de vazão DMY-2030, da marca CONTECH para o controle do fluxo de fluido de corte. _____	52
Figura 3.15 – Geometria do corpo de prova em aço ABNT 4340 temperado e revenido _____	55
Figura 3.16 – Sistema de fixação do corpo de prova temperado e revenido antes de ser retificado. _	56
Figura 3.17 – Geometria do corpo de prova usado para a marcação do desgaste do rebolo _____	57
Figura 3.18 – Sistema de fixação do corpo de prova (ABNT 1045) pra marcação do desgaste do rebolo _____	57
Figura 3.19 – Desenho dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa. _____	58
Figura 3.20 – Dressadores Tipo Fliese usados nesta pesquisa. _____	58
Figura 3.21 – Esquema da montagem do dressador fliese (vista lateral). _____	59
Figura 3.22 – Seqüência dos ensaios realizados. _____	61
Figura 3.23 – Fluxograma do projeto. _____	62
Figura 3.24 – Circuito eletrônico (CurvoPower) para aquisição da força tangencial de corte _____	64
Figura 3.25 – Localização do encoder acoplado no eixo do motor da retificadora _____	66
Figura 3.26 – Exemplo do gráfico gerado pelo programa de obtenção da força tangencial de corte. _____	67
Figura 3.27 – Localização e fixação do sensor de emissão acústica _____	68
Figura 3.28 – Exemplo do gráfico gerado pelo programa de obtenção da emissão acústica de um dos ensaios realizados (Ensaio 12). _____	69
Figura 3.29 – Tela do programa de aquisição de dados para algumas das variáveis de saída obtidas diretamente durante o processo de retificação _____	70
Figura 3.30 – Montagem dos equipamentos para aquisição dos dados _____	71
Figura 3.31 – Suporte bipartido fixado à contra-ponta. _____	73
Figura 3.32 – Tela do programa de acompanhamento do ensaio _____	75

Figura 3.33 – Exemplo da disposição dos equipamentos para a medição da rugosidade (R_a)	77
Figura 3.34 – Aparelho TESA TT10 durante a medição indireta do desgaste do tarugo	78
Figura 3.35 – Medidor de circularidade.	79
Figura 3.36 – Divisão da peça para análise.	80
Figura 3.37 – Embutimento do corpo de prova para tensão residual, (a) vista superior, (b) vista lateral	80
Figura 3.38 – Amostra utilizada para análise da tensão residual	81
Figura 3.39 – Difrátômetro modelo D5000 da marca Siemens do CCDM (Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais) UFSCar.	82
Figura 3.40 – Preparação corpo de prova para MEV, (a) vista superior, (b) vista lateral	83
Figura 3.41 – Amostra utilizada para análise de MEV	84
Figura 3.42 – Microscópio eletrônico de varredura DSM 960 do Instituto de Física de São Carlos, USP – São Carlos.	84
Figura 3.43 – Embutimento do corpo de prova para a análise de microdureza, (a) vista superior, (b) vista lateral.	85
Figura 3.44 – Amostra utilizada para análise de microdureza	86
Figura 4.1– Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada nas forças tangenciais de corte máximas	88
Figura 4.2– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL e MC nas forças tangenciais de corte.	89
Figura 4.3– Análise das formas de aplicação de fluido de corte nas forças tangenciais de corte.	91
Figura 4.4– Condição otimizada 30m/s (ensaio 25)	92
Figura 4.5– Condição MQL 40ml/h (Ensaio 17)	92
Figura 4.6– Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na energia específica de retificação	95
Figura 4.7– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na energia específica de retificação.	96
Figura 4.8– Análise das formas de aplicação de fluido de corte na Energia Específica de retificação.	97
Figura 4.9– Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na emissão acústica.	99
Figura 4.10– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na emissão acústica.	100
Figura 4.11– Análise das formas de aplicação de fluido de corte na emissão acústica	102
Figura 4.12– Ensaio 2 (Convencional)	103
Figura 4.13– Ensaio 7 (MQL 80ml/h)	103
Figura 4.14– Ensaio 12 (MQL 60ml/h)	103
Figura 4.15– Ensaio 17 (MQL 40ml/h)	103
Figura 4.16– Ensaio 25 (otimizada 30m/s)	103
Figura 4.17– Ensaio 20 (otimizada 27m/s)	103
Figura 4.18– Ensaio 25 (otimizada 25 m/s)	104
Figura 4.19– Ensaio 40 (otimizada 20m/s)	104
Figura 4.20– Ensaio 45 (otimizada 15m/s)	104
Figura 4.21– Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na rugosidade	106
Figura 4.22– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na rugosidade	107
Figura 4.23– Análise das formas de aplicação de fluido de corte na rugosidade	109
Figura 4.24– Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada no desgaste diametral do rebolo de CBN	111
Figura 4.25– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL e método convencional no desgaste diametral do rebolo de CBN	112
Figura 4.26– Análise das formas de aplicação de fluido de corte no desgaste diametral do rebolo de CBN.	113
Figura 4.27– Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada no desvio de circularidade.	114

Figura 4.28– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL no desvio de circularidade	115
Figura 4.29– Análise das formas de aplicação de fluido de corte nos desvios de circularidade.	116
Figura 4.30– Microdureza Vickers média para condições otimizadas, método convencional, ensaio a seco, e peça somente torneada.	118
Figura 4.31– Microdureza Vickers média para condições de MQL, método convencional, ensaio a seco, e peça somente torneada.	120
Figura 4.32– Microdureza Vickers médias para as condições de MQL, MO e MC, ensaio com queima e peça somente torneada.	121
Figura 4.33– Microdureza Knoop média para condições otimizadas, método convencional, ensaio a seco e peça somente torneada.	122
Figura 4.34– Microdureza Knoop média para condições de MQL, método convencional, ensaio a seco e peça somente torneada.	123
Figura 4.35– Microdureza Knoop médias para as condições de MQL, MO e MC, ensaio com queima e peça somente torneada.	124
Figura 4.36– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na tensão residual	126
Figura 4.37– Influência da velocidade de aplicação do fluido no sistema otimizado na tensão residual.	128
Figura 4.38– Análise das formas de aplicação de fluido de corte na tensão residual.	129
Figura 4.39– Microscopia de um corpo de prova somente torneado e temperado.	131
Figura 4.40– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação – (Ensaio 46-queima).	132
Figura 4.41– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação – (Ensaio 46-queima).	133
Figura 4.42– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com lubri-refrigeração convencional – (Ensaio 45).	134
Figura 4.43– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com lubri-refrigeração otimizada com velocidade de aplicação do fluido de 30m/s (Ensaio 18).	135
Figura 4.44– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com lubri-refrigeração otimizada com velocidade de aplicação do fluido de 27m/s (Ensaio 23).	136
Figura 4.45– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com lubri-refrigeração otimizada com velocidade de aplicação do fluido de 25m/s (Ensaio 27).	136
Figura 4.46– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com lubri-refrigeração otimizada com velocidade de aplicação do fluido de 20m/s (Ensaio 32).	137
Figura 4.47– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com lubri-refrigeração otimizada com velocidade de aplicação do fluido de 15m/s (Ensaio 38).	137
Figura 4.48– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL com vazão de fluido de corte de 80ml/h (Ensaio 4).	138
Figura 4.49– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL com vazão de fluido de corte de 60ml/h (Ensaio 9).	139
Figura 4.50– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL com vazão de fluido de corte de 40ml/h (Ensaio 14).	139
Figura 4.51– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL com vazão de fluido de corte de 40ml/h (Ensaio 15).	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades de alguns materiais abrasivos (Malkin,1989 e Felipe Jr,1992, adaptada).....	20
Tabela 2.2 – Impactos que ocorrem no rendimento de um rebolo superabrasivo de cbn devido às alterações dos grãos e dos ligantes (Bianchi, et al., 2001).....	27
Tabela 2.3 – Características dos principais tipos de fluidos de corte utilizados nas indústrias (WEBSTER, 1995).....	30
Tabela 3.1 – Velocidades e vazões utilizadas na aplicação com a técnica otimizada.....	53
Tabela 3.2 – Vazões utilizadas na aplicação MQL.....	53
Tabela 3.3 – Vazões e velocidades utilizadas na aplicação convencional.....	53
Tabela 3.4 – Composição química do aço ABNT 4340 (%).....	55
Tabela 3.5 – Características dos ensaios.....	60
Tabela 3.6 – Valores de potência elétrica e tensão para obtenção da curva de calibração da potência elétrica.....	64
Tabela 3.7 – Valores da frequência, rotação e tensão utilizados para a calibração da curva de rotação do rebolo.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a	penetração do rebolo na peça	[mm]
ABNT	associação brasileira de normas técnicas.	
a_d	penetração de dressagem	[μm]
As_d	área de dressagem	[mm^2]
b	largura de retificação	[mm]
b_a	largura de atuação do dressador	[μm]
b_{dr}	largura real de atuação do dressador	[μm]
CBN	nitreto de boro cúbico	
CNC	comando numérico computadorizado	
D	diâmetro da mangueira de alimentação de fluido de corte	[mm]
d	diâmetro do bocal de aplicação de fluido de corte	[mm]
d_s	diâmetro do rebolo	[mm]
d_w	diâmetro da peça	[mm]
EA	emissão acústica	[V]
FEPA	Federação Européia dos Produtores de Abrasivos	
F_n	força normal de corte	[N]
F_{tc}	força tangencial de corte	[N]
G	relação G	-
h_{eq}	espessura equivalente de corte	[μm]
HK	Dureza Knoop	[kgf/mm^2]
HV	Dureza Vickers	[kgf/mm^2]
ISO	International Organization for Standardization	
LUA	Laboratório de usinagem por abrasão	
MC	método convencional	
MEV	microscopia eletrônica de varredura	
MO	Método otimizado	
MQL	mínima quantidade de lubrificante	
NR	Norma regulamentadora	
n_s	rotação do rebolo	[rpm]
n_w	rotação da peça	[rpm]
P_{elet}	potência elétrica	[W]
pH	potencial hidrogeniônico	
P_{mec}	potência mecânica	[W]
PPM	pontos por milhão	
Q	vazão de fluido de corte	[m^3/s]
Q_w'	taxa de remoção específica de material	[mm^2/s]
rp	raio da ponta do dressador	[μm]

S_d	passo de dressagem	[mm]
T	torque	[N.m]
t_s	tempo de centelhamento	[s]
u	energia específica total de retificação para o corte	[J/mm ³]
u_{ch}	energia referente à formação do cavaco	[J/mm ³]
U_d	grau de recobrimento de dressagem	-
u_{pl}	energia utilizada na deformação do material	[J/mm ³]
u_{sl}	energia de deslizamento do grão na peça	[J/mm ³]
V	tensão de saída	[V]
V_f	velocidade de mergulho	[mm/min]
V_j	velocidade do jato de fluido de corte	[m/s]
V_s	velocidade de corte	[m/s]
V_w	velocidade da peça	[m/s]
Z_s	volume de rebolo gasto	[mm ³]
Z_w	volume de material removido	{mm ³ }

1. INTRODUÇÃO

A retificação confere à peça o acabamento final, minimizando as rugosidades e irregularidades superficiais através de interações entre os grãos abrasivos de uma ferramenta (rebolo) e a peça a ser retificada. A retificação, segundo Stemmer (1992), enquadra-se como processo de usinagem com ferramenta (rebolo) com a parte cortante de geometria indefinida.

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. No entanto, diversos processos de usinagem, incluindo a retificação, utilizam fluidos de corte como meio de lubrificação e refrigeração da peça produzida.

Nestes processos de fabricação, se a lubrificação e a refrigeração não forem satisfatórias, as elevadas temperaturas geradas podem produzir vários tipos de danos à peça produzida. Estes danos são: queima superficial, mudanças microestruturais, aparecimento de tensões residuais, erros de forma e até a deterioração da qualidade final da peça produzida (MALKIN, 1989; GUO, 1999).

Os fluidos de corte são muitas vezes descartados no meio ambiente, fato que não condiz com a situação atual levando-se em consideração o rigor das leis ambientais e devido a evolução ambiental do homem. Ainda existe o alto custo relativo aos fluidos de corte que vêm se tornando mais acentuados devido ao elevado consumo e o tratamento desse fluido de corte no momento do descarte de forma a atender as exigências ambientais (NOVASKI & RIOS, 2002). Segundo Webster et al. (1999), grandes volumes de fluido de corte estão se tornando necessários, devido ao crescimento da produtividade das indústrias e ao crescimento da utilização do processo.

Se não bastasse, ainda existe o problema de que muitos fluidos de corte ainda trazem muitas conseqüências à saúde dos operadores das máquinas envolvidas com estes fluidos. No entanto esse problema vêm sendo diminuído através do uso de fluidos à base vegetal que trazem menos danos à saúde. Devido às pressões exercidas por agências de proteção ambiental e de saúde, os fabricantes vêm buscando fabricar produtos cada vez mais saudáveis aos operadores e menos danosos ao meio ambiente (MAYER & FANG, 1993).

Dessa forma, a utilização em massa dos fluidos de corte tende a diminuir com o passar do tempo, tornando-se necessário pesquisas a respeito de tal assunto, visando a diminuição da participação de tais fluidos nos processos produtivos e, conseqüentemente, no meio ambiente.

Para tanto, são necessárias análises mais aprofundadas das conseqüências desse tipo de alteração com relação ao estado final do componente usinado.

Segundo Webster et al. (1995), uma das maneiras de se melhorar a eficiência do processo de retificação está em aplicar um jato de fluido incidindo de forma direta sobre a região de corte. Esse jato é capaz de reduzir de forma significativa a temperatura na região, porém altas velocidades do jato são necessárias para a penetração do fluido de maneira efetiva na região de corte. A lubrificação e a refrigeração dependem da efetiva entrada de fluido na região de corte entre a peça e a ferramenta, não havendo a necessidade de volumes elevados, considerando que parte deste não esteja penetrando na região de corte efetivamente. Porém, o tipo e o posicionamento do bocal exercem grande influência no processo de corte. Bocais de aplicação preparados de forma e evitar a turbulência apresentam um melhor efeito, pois tendem a aproximar as lâminas de fluido que se formam no interior do bocal.

Considerando estas informações, surge a importância de avaliar a qualidade das peças produzidas através do uso de métodos mais eficientes de aplicação de fluido de corte. Nesta pesquisa utilizou-se três métodos de aplicação de fluido de corte para a avaliação do desgaste das peças produzidas (método convencional, método otimizado também denominado método de Webster e método da mínima quantidade de lubrificante - MQL) utilizando novos conceitos de bocais e rebolo de CBN com baixa concentração de abrasivos.

Nesta pesquisa utilizou-se fluidos de corte de baixo impacto ambiental e à saúde, que ainda se encontram em fase de desenvolvimento pelos fabricantes com raras aplicações industriais. Através da qualidade obtida das peças retificadas com esses fluidos poderá haver uma utilização maior de fluidos com essas mesmas características, contribuindo significativamente para o processo e para a sociedade.

Destaca-se ainda neste trabalho a inovação quanto à utilização de novos conceitos quanto às formas de lubrificação no processo de retificação que poderão ser estendidos a outros processos que também utilizam fluidos de corte. As formas de lubri-refrigeração utilizadas (convencional, mínima quantidade de lubrificação e otimizada) buscaram atender condições reais de serem aplicadas no meio industrial através da usinagem de grandes regiões. Para isso foi necessário o estudo e a confecção de bocais de aplicação de fluido apropriados utilizando novos formatos de aplicadores até então não disponíveis comercialmente.

Também buscou-se inovar na quantidade de material abrasivo presente no rebolo. Um dos motivos que prejudica uma maior expansão do consumo de rebolos de CBN está no valor do mesmo que é muito maior que rebolos convencionais, que é dependente da quantidade de grãos de CBN presentes. Nesta pesquisa utilizou-se um rebolo de CBN com concentração de

15% de grãos abrasivos em volume, buscando uma alternativa mais econômica para fabricação de peças retificadas.

Com os resultados deste trabalho, várias empresas do ramo de retificação poderão se beneficiar, pois este sugere uma reformulação na quantidade de fluido de corte utilizado, procurando-se obter condições que nada ou pouco alterem o estado final da peça retificada, utilizando fluidos de corte ambientalmente corretos, contribuindo assim de maneira significativa para o progresso científico.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a qualidade de peças retificadas através de três formas de aplicação de fluido de corte na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 usando 2 diferentes tipos de fluídos de corte que proporcionam menores danos ambientais e à saúde e uma ferramenta superabrasiva de CBN com baixa concentração de abrasivos. As três formas de lubri-refrigeração utilizadas foram: mínima quantidade de refrigeração (MQL), lubri-refrigeração otimizada (MO) e lubri-refrigeração convencional (MC), utilizando novos conceitos de bocais que buscam criar condições possíveis de serem empregadas no meio industrial. Busca-se encontrar o compromisso entre qualidade, custo e meio ambiente quando aplicados sistemas de lubri-refrigeração mais eficientes através de bocais inovadores capazes de serem usados industrialmente. A influência na qualidade foi avaliada através da análise da rugosidade, do desvio de circularidade, do desgaste diametral do rebolo, da força tangencial de corte, da energia específica de retificação, da emissão acústica, da tensão residual gerada, da análise de microscopias e da microdureza dos corpos de prova ensaiados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos tratados neste trabalho. É descrito o método de retificação cilíndrica externa por mergulho usado e as principais variáveis envolvidas, as três formas de aplicação de fluido de corte utilizadas e é discutido o conceito de fluido de corte.

2.1. RETIFICAÇÃO

Nos últimos tempos, com o processo de globalização da economia, as indústrias nacionais vêm sofrendo a crescente concorrência internacional. Para que um produto seja competitivo, do ponto de vista do consumidor, é preciso que a relação custo/benefício seja ótima. Por sua vez, para que uma empresa esteja inserida em tal competição, seu produto deve ser fabricado em um tempo curto, apresentando alta qualidade e baixo preço. Inserido em tal contexto, encontra-se o processo de retificação.

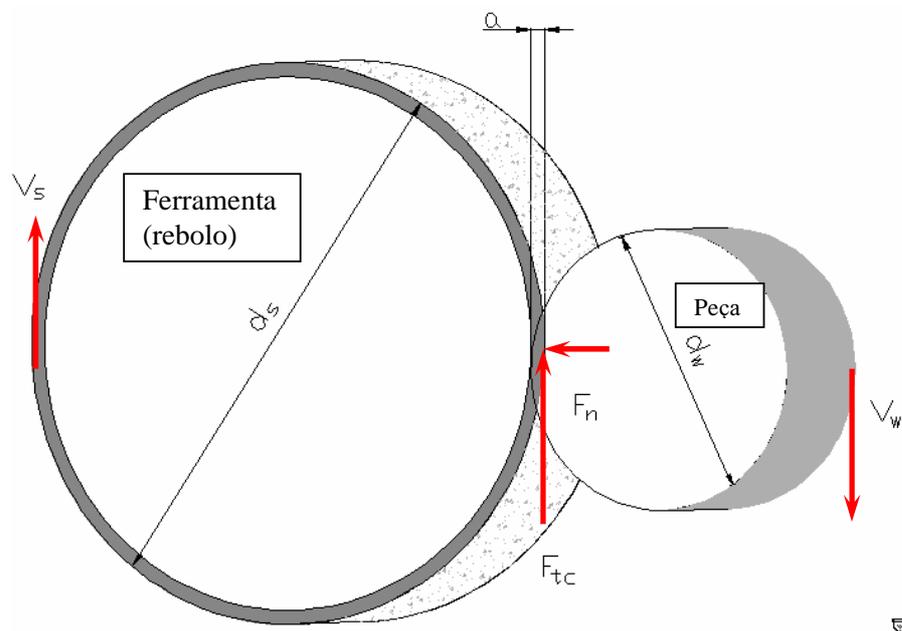
Vieira Júnior et al. (1999) cita que a retificação vem sendo considerada como um dos mais importantes processos de manufatura, tendo como objetivo melhorar o acabamento superficial e garantir a integridade das peças acabadas. A retificação é um processo de alta precisão e importância, uma vez que é inaceitável perder uma peça nesta etapa, pois o valor agregado ao material nesta fase é elevado devido aos vários processos que antecederam a retificação (SOARES & OLIVEIRA, 2002).

A retificação é um dos processos de acabamento mais utilizados na fabricação de peças que necessitam de elevada qualidade superficial, dimensional ou geométrica. Ocorre através de interações entre os grãos abrasivos de uma ferramenta e a peça a ser retificada. É o processo que visa solucionar os problemas de qualidade e tempo de toda a seqüência de fabricação, embora seja um dos processos que apresentam menor domínio tecnológico (OLIVEIRA, 1998).

Malkin (1989) descreve que o processo de retificação é de bastante complexidade, uma vez que este apresenta muitas variáveis envolvidas, e estas são muito sensíveis a pequenas alterações. Tönshoff et al. (2002) diz ser necessário analisar o maior número de variáveis possíveis para se monitorar melhor a retificação evitando assim perdas de peças durante o processo.

2.1.1. Retificação cilíndrica externa de mergulho

A operação de retificação cilíndrica externa de mergulho consiste, basicamente, na profundidade total de mergulho a , também encontrado como a_p , correspondente ao final do ciclo de retificação, com velocidade de corte da ferramenta V_s , velocidade de mergulho (velocidade de avanço) V_f , rotação da peça n_w , velocidade do jato de fluido V_j , diâmetro da ferramenta d_s e diâmetro da peça d_w . Na Figura 2.1 estão representadas estas variáveis e algumas variáveis de saída do processo como a força tangencial de corte F_{tc} e força normal de corte F_n .



<u>Parâmetros de entrada:</u>	<u>Variáveis de saída:</u>
<ul style="list-style-type: none"> • Condições de usinagem • Material da peça • Tipo do rebolo • Tipo do fluido de corte • Condições de afiação da ferramenta • Velocidade de aplicação do fluido de corte (otimizada) • Vazão de fluido de corte (MQL) • Concentração e pH do fluido (para emulsão) 	<ul style="list-style-type: none"> • Força tangencial de corte • Energia específica de retificação • Emissão acústica • Desvio de Circularidade • Rugosidade • Desgaste radial do rebolo • Tensão residual • Microdureza • Análise Microestrutural

Figura 2.1 – Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN, 1989, adaptada).

2.1.1.1. Parâmetros de Caracterização

Três importantes parâmetros permitem compreender alguns fenômenos do processo de retificação e facilita a comparação de grandezas entre processos com geometrias diferentes: Estes parâmetros são: arco ou comprimento de contato, diâmetro equivalente e espessura de corte equivalente e são apresentados a seguir.

2.1.1.1.1. Arco ou Comprimento de Contato (l_c)

O arco ou comprimento de contato (l_c) define a extensão do contato entre o rebolo e a peça durante o processo de retificação. Pode-se calcular o comprimento de contato, considerando apenas a geometria dos elementos de contato, através da Equação 2.1:

$$l_c = (a \cdot d_e)^{1/2} \quad (2.1)$$

Onde: a = profundidade de penetração do rebolo,

d_e = diâmetro equivalente.

Malkin (1989) afirma que a validade deste equacionamento é para retificação plana, não considerando os movimentos e deformações envolvidas no processo.

2.1.1.1.2. Diâmetro Equivalente (d_e)

Segundo King & Hahn (1992), o diâmetro equivalente (d_e) estabelece que a diferença de curvatura entre rebolo e a peça influi no comprimento de contato. O diâmetro equivalente correlaciona a retificação plana e a diferença de curvatura em retificações internas e externas. O diâmetro equivalente é dado por:

$$d_e = d_s / [1 \pm (d_s / d_w)] \quad (2.2)$$

Onde : d_s = diâmetro do rebolo,

d_w = diâmetro da peça.

Na Equação 2.2, o sinal positivo representa a operação cilíndrica externa, e o sinal negativo a operação cilíndrica interna. No caso da retificação plana, o diâmetro da peça (d_w) tem valor infinito (Malkin, 1989).

De forma geral, o diâmetro equivalente representa o grau com que a superfície do rebolo e a peça se adaptam, no caso da retificação plana. Na retificação cilíndrica, ele

representa o diâmetro que o rebolo de uma operação plana tangencial deveria ter para proporcionar a mesma geometria de corte e comprimento de contato.

2.1.1.1.3. Espessura de Corte Equivalente (h_{eq})

A definição de espessura de corte equivalente é dada como a relação entre a taxa de remoção e a velocidade de corte (velocidade periférica do rebolo). Matematicamente, tem-se:

$$\begin{aligned} h_{eq} &= (a \cdot V_w) / V_s \quad \text{para Retificação Plana ou} \\ h_{eq} &= (\pi \cdot d_w \cdot V_f) / V_s \quad \text{para Retificação cilíndrica} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Onde: a = profundidade de penetração do rebolo,

V_w = velocidade periférica da peça,

V_s = velocidade periférica do rebolo.

De forma geral, a espessura equivalente representa a espessura da camada de material que é arrancada pelo rebolo com a velocidade periférica deste, e cujo volume específico equivale àquele retirado da peça naquele tempo.

Tal parâmetro é o que melhor caracteriza o processo de retificação, uma vez que está englobando três importantes características do processo. A velocidade de corte é responsável pela “dureza dinâmica” do rebolo, e a sua elevação proporciona o aumento do número de grãos ativos num mesmo intervalo de tempo provocando o decréscimo na força de corte, devido à menor participação de cada grão na operação, e com isto proporcionando uma maior vida do rebolo (Malkin, 1989).

2.1.1.2. Parâmetros de corte envolvidos na retificação

Neste item são definidos os parâmetros de corte envolvidos no processo de retificação cilíndrica.

2.1.1.2.1 Profundidade de corte (a)

Segundo König (1980), aumentando-se a profundidade de corte, tem-se um aumento instantâneo do número de grãos ativos do rebolo atritando com a peça e no tempo de contato. Este aumento da profundidade de corte também reflete em um acréscimo nas forças tangenciais de corte e energias específicas de retificação devido as maiores espessuras equivalentes dos cavacos a serem removidos. De acordo com Rowe & Morgan (1993), a

profundidade de corte pode influenciar ainda na integridade superficial dos componentes retificados.

2.1.1.2.2 Velocidade de mergulho (V_f)

A velocidade de mergulho V_f , também definida como velocidade de avanço, afeta o acabamento pretendido. A força tangencial de corte se eleva com o aumento da velocidade de avanço do rebolo. Fato também verificado por Alves (2005).

De acordo com os experimentos de Lee & Kim (2001), o valor da corrente é inversamente proporcional à velocidade do rebolo e diretamente proporcional à taxa de avanço.

De acordo com Baldo (1994), no início do processo de retificação ou desbaste, removem-se cerca de 95% do material da peça, sendo que a velocidade de avanço deve variar entre 0,4 a 2,0 mm/min. Já para o restante do material, o mesmo deve ser acabado com um avanço entre 0,1 a 0,3 mm/min.

2.1.1.2.3 Velocidade de corte (V_s)

A velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo V_s é representada pelo deslocamento de um ponto na superfície de corte do rebolo em um certo espaço de tempo. Esta velocidade é extremamente importante no processo de retificação, pois determina a vida do rebolo, implicando na alteração da capacidade de remoção dos grãos abrasivos e no acabamento superficial das peças (WINTER, 2004). Influencia na força tangencial de corte, rugosidade, desgaste do rebolo, queima superficial da peça, tensão residual, etc.

Segundo Diniz et al. (2000), a velocidade periférica do rebolo é restrita pela resistência da liga aglomerante. Para as ligas vitrificadas estabelece-se como velocidade de corte normalmente de 30m/s e para algumas ligas vitrificadas especiais cerca de 60m/s. No caso de algumas ligas resinóides especiais a velocidade de corte fica em torno de 100m/s.

De acordo com Graf (2004), a velocidade de corte pode ser expressa pela Equação 2.4:

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

Aumentando-se a velocidade de corte, um único grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavacos, devido à elevação da frequência de contato com a peça. Desta forma, tem-se uma espessura menor dos cavacos removidos para velocidades de mergulho constantes, reduzindo, por exemplo, as forças de corte, pela menor solicitação de cada grão

abrasivo. Desta forma o rebolo tem sua dureza dinâmica elevada. Contudo, o aumento da intensidade de contato dos grãos com a peça, deve de certo modo ser monitorado, pois pode gerar uma elevação da temperatura, o que pode ocasionar a queima da peça.

2.1.1.2.4 Velocidade da peça (V_w)

Na retificação cilíndrica externa, esta velocidade coincide com a velocidade periférica da peça. De acordo com Graf (2004) a velocidade da peça V_w pode ser determinada em função do diâmetro e rotação da mesma conforme Equação 2.5:

$$V_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (2.5)$$

Segundo Graf (2004), pode-se afirmar que o aumento da velocidade da peça acarreta em uma elevação da taxa de remoção de material, gerando cavacos mais grossos e carga superior sobre cada grão abrasivo do rebolo.

2.1.2. Variáveis envolvidas no processo de retificação

Neste item são destacadas algumas variáveis importantes que são analisadas no decorrer deste trabalho.

2.1.2.1 Força tangencial de corte (F_{tc}) e energia específica de retificação (u)

De acordo com Bianchi (1999b), as forças de corte no processo de retificação são importantes, pois influenciam a qualidade geométrica, dimensional e superficial da peça, a vida do rebolo (desgaste volumétrico) e por fim o tempo de execução do processo de corte. Os valores médios das forças de corte a serem empregados durante a usinagem também são importantes porque determinam a potência necessária para a máquina retificadora, assim como suas necessidades estruturais.

Segundo Bianchi et al. (2001), com força tangencial de corte F_{tc} pode-se analisar o desempenho das ferramentas abrasivas e detectar: a ocorrência do macro e microdesgaste; a capacidade de fixação dos grãos pelo ligante; aumento da temperatura na região de corte e estado de tensão residual. Ressalta-se ainda que variando a espessura do cavaco, alteram-se as forças de corte num grão abrasivo.

Para Malkin (1989) há uma relação direta entre o aumento das forças de corte (tangencial e normal) e aumento da área de desgaste do topo dos grãos. Estas forças associadas à energia específica de retificação podem ser constituídas de componentes como

corte e deslizamento, considerando que o desgaste do topo do grão é influenciado pelas condições de dressagem, pela dureza do ligante do rebolo e tipo de fluido de corte utilizado (SCHWARZ, 1999).

De acordo com Oliveira et al. (1992), outro fator que influencia fortemente os valores das forças de corte é a granulometria do rebolo utilizado.

De acordo com Monici (2003), a energia específica de retificação u é uma variável de saída que está diretamente relacionada com possíveis danos térmicos.

Para Malkin (1989), a energia total de retificação u , é composta das energias de remoção do cavaco u_{ch} , de deslizamento dos grãos abrasivos de áreas de topo desgastadas com a peça u_{sl} , e do deslocamento de material por deformação plástica sem a remoção deste u_{pl} .

Segundo Malkin (1989) e Lee et al. (2003), a energia específica de retificação pode também ser expressa em função da força tangencial de corte conforme Equação 2.6, na qual o numerador representa a potência associada ao processo de corte e o denominador é a taxa volumétrica de material removido.

$$u = \frac{F_{tc} \cdot V_s \cdot 60}{\pi \cdot d_w \cdot V_f \cdot b} \quad (2.6)$$

Onde: b = largura de retificação;

2.1.2.2. Desgaste diametral do rebolo e relação G

O desgaste do rebolo pode ser expresso tanto pela sua perda diametral, bem como, pela redução volumétrica do mesmo. Para Malkin (1989) e Shaw (1994, 1996) há três principais mecanismos de desgaste do rebolo que são: atrito, fratura dos grãos abrasivos e do aglomerante. Destes, segundo Malkin (1989), o desgaste por atrito, na maioria das vezes é o mais importante, pois controla as forças de corte e a taxa de fratura do aglomerante, embora resulte em uma pequena contribuição na quantidade de desgaste volumétrica total do rebolo. Segundo Kovacevic & Mohan (1995), do desgaste volumétrico total do rebolo, apenas 10% ocorre durante o processo de retificação, pois o restante é perdido durante os processos de dressagem e avivamento dos grãos abrasivos.

De acordo com Silva (2000), a relação G expressa o desempenho de um rebolo, pois esta relação é a razão entre o volume de material removido e o volume de rebolo gasto na operação. Segundo König (1980), a relação G que mede o desempenho do rebolo pode ser determinada pela Equação 2.7:

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (2.7)$$

Onde: Z_w = volume de material removido;

Z_s = volume de rebolo gasto;

Os fatores que podem afetar o desempenho do rebolo são o tipo de liga aglomerante e sua estrutura. No caso das estruturas fechadas os grãos abrasivos estão dispostos bem juntos uns dos outros, e nas estruturas abertas há um maior espaçamento entre estes grãos, o que gera maiores cavidades para os cavacos e menos arestas cortantes por unidade de área (OLIVEIRA, 2002).

2.1.2.3. Rugosidade das Peças Retificadas

Rugosidades são micro-irregularidades geométricas decorrentes do processo de fabricação. Sua quantificação é feita pelos parâmetros de altura e largura das irregularidades. Sua magnitude está diretamente relacionada ao coeficiente de atrito, desgaste, lubrificação, transmissão de calor, resistência mecânica, rigidez do equipamento, a velocidade de remoção, a granulação dos abrasivos, entre outros fatores (WINTER, 2004). Em estudos realizados por Alves (2005), notou-se a relação direta existente entre rugosidade e velocidade de mergulho.

De acordo com Carpinetti (2000) rugosidades caracterizam-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 ordens de grandeza crescentes.

Segundo Dagnal (1986) & 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) e média da inclinação das irregularidades do perfil.

Considerações sobre a geração de rugosidade na retificação foram feitas por Malkin (1989), dentre as quais ressalta-se: a rugosidade de peças retificadas é devido aos riscos feitos pelos grãos abrasivos; ao material da peça que adere ao rebolo e que não é liberado pelo fluido de corte e posteriormente é impregnado na peça; ou ainda, por partículas abrasivas que se quebram durante o corte e ficam aderidas à peça.

Malkin (1989) abordou empiricamente a rugosidade no processo de retificação. Em tal enfoque, há a consideração de que um centelhamento completo (rebolo trabalhando sobre a superfície da peça sem haver avanço denominado de spark-out) diminui pela metade a rugosidade da peça, comparando com a ausência de centelhamento. Outra questão considerada é a rugosidade do rebolo, uma vez que rebolos com rugosidades menores tendem a gerar menor rugosidade na peça. Outra afirmação importante é que o desgaste do rebolo e o aumento da vibração do sistema prejudicam o acabamento da peça.

Nesta pesquisa utilizou-se o parâmetro de rugosidade Ra (*roughness average*) que significa rugosidade média. O parâmetro de rugosidade Ra é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro de um percurso de medição.

2.1.2.4. Emissão Acústica

Segundo Soares & Oliveira (2002), a Emissão Acústica (EA) é caracterizada pelas ondas de tensões produzidas pelo movimento súbito dos materiais tensionados, sendo que as emissões clássicas provêm dos processos de deformação, como o crescimento de uma trinca e deformações plásticas.

De acordo com Inasaki (1990), as ondas acústicas ficam predispostas a vários efeitos como: amortecimento, frequência dependente da velocidade, reflexão, e outros devido à sua propagação pelo material. Devido ao fato da EA também ser caracterizada como uma energia resultante da interação entre os grãos abrasivos e a superfície da peça que se propaga pela estrutura do material, esta pode ser relacionada com a energia específica de retificação, a qual também é uma forma de energia associada ao processo de retificação.

Webster et al. (1996), cita que uma das melhores formas de se monitorar o sinal de emissão acústica é pelo seu valor RMS (valor quadrático médio), o qual é um valor retificado do sinal de EA em intervalos de tempo determinado, e vem sendo amplamente utilizado com sucesso para monitoramento de diversos problemas de retificação.

A técnica de emissão acústica vem sendo usada para vários objetivos tais como: detecção do desgaste, queima, colisão do rebolo, eliminação de espaços de retificação, verificação da dressagem, dentre outros (AGUIAR, 1997). Em contrapartida, o principal prejuízo encontrado em tal técnica, está na sensível dependência da localização do sensor, uma vez que quanto mais próximo o sensor do ponto de retificação, melhor a sensibilidade e a leitura dos dados (LEE et al, 2001).

2.1.2.5. Desvio de Circularidade

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.

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, porém a tolerância de circularidade tem de ser estreita, para evitar vazamentos.

De acordo com Malkin (1989), 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.

2.1.2.6. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Paralelamente ao desenvolvimento dos microscópios eletrônicos de transmissão surgiu o microscópio eletrônico de varredura, um 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.

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.

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, 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 visualização tridimensional.

As principais vantagens do MEV em relação a um microscópio óptico são a resolução e a profundidade de foco, pois o microscópio eletrônico de varredura apresenta uma resolução de cerca de 0,003 μm , enquanto o óptico de 0,1 μm . No MEV é possível que se realizem ampliações de até 300.000 vezes (GOLDSTEIN et al., 1992).

2.1.2.7. Microdureza

A dureza é uma propriedade mecânica que avalia a resistência à deformação plástica localizada. A dureza é obtida através da aplicação de uma carga a um indentador sobre a superfície de um material. Dividindo o valor da carga aplicada pela a área residual projetada de indentação obtém-se o valor da dureza.

O ensaio de dureza é amplamente aplicado em pesquisas e no ramo industrial por ser um método barato e rápido de execução sendo possível a utilização de durômetros portáteis.

Atualmente existem vários testes qualitativos para a análise de dureza de materiais. Entre eles têm-se dureza Rockwell, Brinell, microdureza Knoop e Vickers.

A microdureza Vickers é obtida com um penetrador de diamante em forma de pirâmide, de base quadrada, com um ângulo de 136° entre as faces opostas (Figuras 2.2a, 2.2b e 2.2c). É utilizada carga menor que 1kgf, a qual produz uma impressão em forma de losango regular com a base quadrada (FERREIRA, 2004).

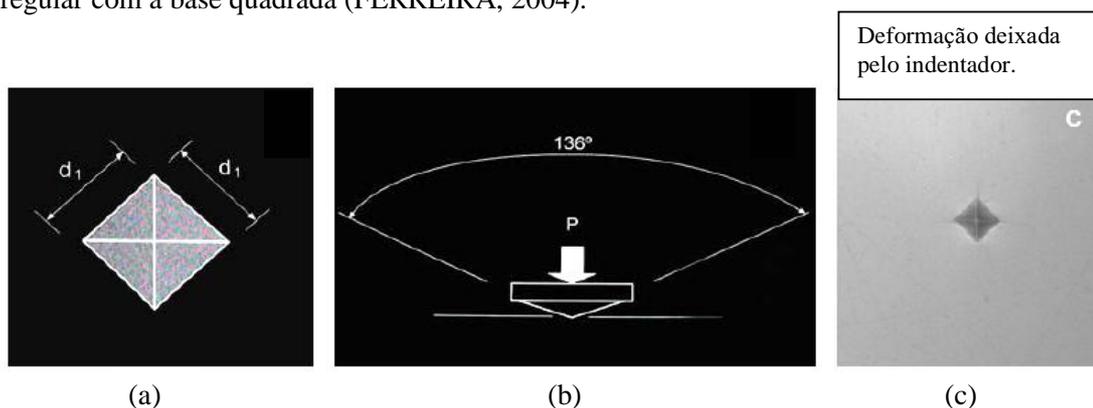


Figura 2.2– a) Base quadrada; b) Angulação; c) Indentação Vickers. (FERREIRA, 2004)

A microdureza Knoop é obtida com um indentador de diamante em forma de pirâmide, alongada (Figuras 2.3a e 2.3b) que apresenta uma relação comprimento-largura-profundidade de aproximadamente 30:4:1 (FERREIRA, 2004).

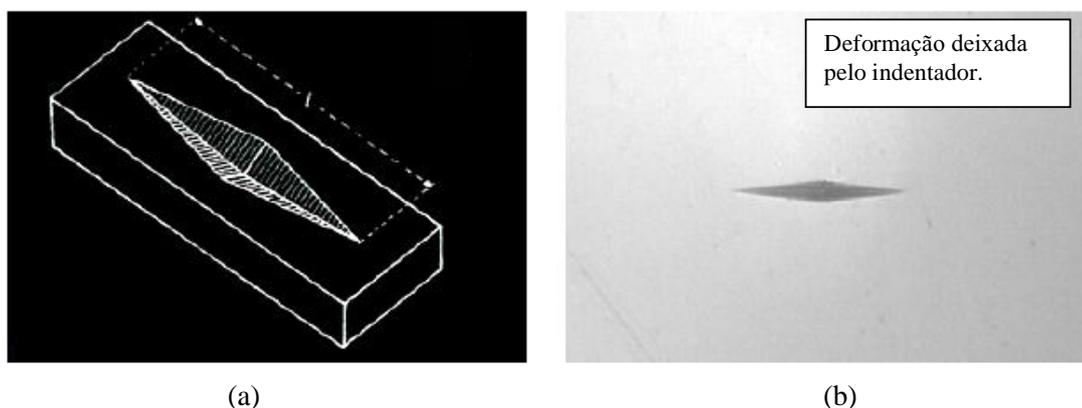


Figura 2.3 - a) Desenho esquemático; b) Indentação Knoop (FERREIRA, 2004).

Segundo Ferreira (2004), a impressão Knoop é largamente utilizada em função de seu formato estreito. O indentador Knoop possibilita o trabalho em regiões finas, ao contrário do indentador Vickers. Para uma mesma carga, a profundidade da impressão Knoop é menor do que a metade da profundidade obtida com a impressão Vickers.

A microdureza é uma variável que reforça as afirmações que podem ser feitas na análise da microscopia do material usinado. A retificação dos aços geralmente se dá após o tratamento térmico dos mesmos. Durante a retificação, dependendo da temperatura do processo de corte pode ocorrer revenimento na peça causando um amolecimento próximo à superfície acabada. A perda de dureza superficial é um fenômeno complexo, relacionado com o revenimento da estrutura martensítica e com a difusão de carbono, e depende da temperatura e tempos envolvidos no corte.

Malkin (1989) afirma ser importante a combinação do comportamento em relação ao revenimento com a análise térmica a fim de prever a queda de dureza na peça.

2.1.3. Mecanismos de Formação do Cavaco

Segundo Malkin (1989), a remoção de material durante a retificação decorre da interação dos grãos abrasivos com a peça e a formação do cavaco dá-se por cisalhamento.

Os esforços de cortes provêm da formação do cavaco. Associado a tais esforços de corte encontra a potência de corte, definida por:

$$P = F_{tc} \cdot (V_s \pm V_w) \quad (2.8)$$

Onde: F_{tc} = força tangencial de corte,

V_s = velocidade periférica do rebolo,

V_w = velocidade periférica da peça.

Na Equação 2.8 o sinal positivo é utilizado para a retificação discordante, e o sinal negativo para a retificação concordante.

A energia específica (u) é uma grandeza derivada da potência e das condições de corte. Tal grandeza é definida como sendo a energia por unidade de volume de material removido. Matematicamente:

$$u = P / Q_w \quad (2.9)$$

Onde: P = potência de corte,

Q_w = taxa de remoção volumétrica.

Em parâmetros de retificação, a taxa de remoção volumétrica é dada por:

$$Q_w = V_w \cdot a \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot V_f \cdot b \quad (2.10)$$

Onde: V_f = velocidade de avanço do rebolo,

b = largura do rebolo,

d_w = diâmetro da peça.

No processo de retificação, a energia específica (energia por volume de cavaco removido) é muito maior do que em outros processos, uma vez que grande parte da energia de retificação é gasta em outros mecanismos além da formação de cavaco, tais como atrito das áreas planas dos grãos abrasivos com o material da peça e deformação do material da peça antes do início da formação de cavaco (MALKIN, 1989).

A remoção do cavaco é dividida, basicamente, em três regiões de micro-fenômenos. A Figura 2.4 representa tais regiões.

Os detalhamentos das regiões foram feitos por Malkin (1989) da seguinte forma:

- Região I: Deformação elástica do material da peça e do material aglomerante do rebolo. A energia fornecida ao processo é consumida na forma de atrito e deformação.

- Região II: Material da peça apresenta deformação plástica, escoamento lateral e recuperação da deformação elástica do estágio anterior devido à contínua penetração do grão abrasivo. A dissipação de energia é feita por deformações e atrito.

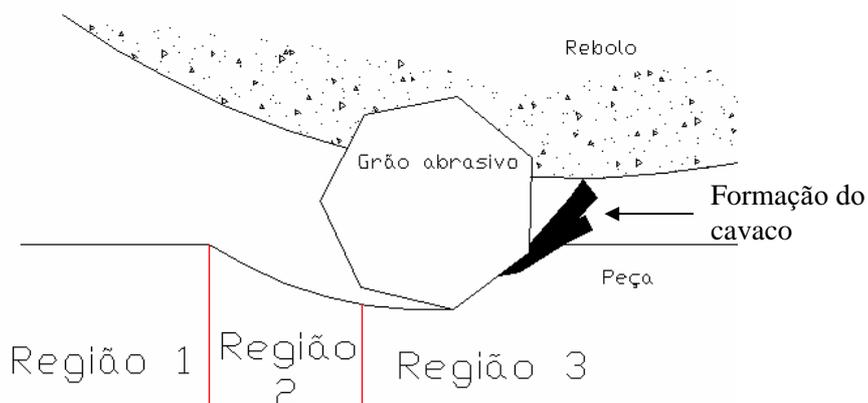


Figura 2.4 - Formação do cavaco por um grão abrasivo, (KÖNIG,1980 e MALKIN, 1989, adaptada)

- Região III: Formação do cavaco, uma vez que a aresta de corte atinge um valor de penetração crítica, correspondendo à uma pressão também crítica. Parte da energia é consumida no cisalhamento do material.

Segundo Nussbaum (1988), as deformações das fases I e II ocorrem porque o ângulo de ataque da ferramenta abrasiva é fortemente negativo. Fato também que ocorre no processo de torneamento. A remoção do cavaco da região de corte se dá pela porosidade do rebolo, sendo expulso da ferramenta pela ação da força centrífuga ou pelo fluido de corte. Caso contrário, ocorrerá o empastamento do rebolo.

2.1.4. Danos Térmicos

As altas temperaturas envolvidas no processo de retificação, devido à alta quantidade de energia por volume de material removido que é convertida em calor, ficando concentrada na região de corte e dissipada através da peça, é causadora de vários danos à peça como queima, tensões residuais de tração, transformação de fase, trincas e redução de resistência à fadiga (MALKIN, 1989). As temperaturas são dependentes do estado de afiação do rebolo, bem como das grandezas do processo (EBBRELL et al, 1999).

Os danos térmicos à camada superficial da peça podem ser provenientes da realização de operações de retificação realizadas sem controle ou mal elaboradas (SHAW,1994) e podem ser entendidas como as modificações das características físicas e/ou químicas da superfície retificada como também daquelas regiões as quais se localizam abaixo desta superfície (WEINGAERTNER et al, 2001).

De acordo com Malkin (1989), a energia consumida no processo de retificação varia entre 20 a 60 J/mm³ e é distribuída na forma de calor para a peça, rebolo, cavaco, meio ambiente, entre outros.

Um dos tipos mais comuns de dano térmico é a queima da peça. Quando a queima superficial começa, existe uma tendência do crescimento de adesão de partículas metálicas nos grãos abrasivos do rebolo, tendo como consequência o aumento das forças de retificação e a deterioração da qualidade superficial da peça.

De acordo com Malkin (1989), a queima superficial caracteriza-se como um dos tipos mais comuns de danos térmicos presentes nas peças retificadas, sendo que a queima visível é observada pela presença de tons azulados na superfície das mesmas, os quais são consequências da formação de uma camada de óxido, que conduz ao aumento do desgaste do rebolo e dos esforços de corte.

Segundo Malkin (2000), o processo de retificação cilíndrica gera tensões residuais nas adjacências da superfície da peça acabada. Estas tensões podem vir a comprometer o comportamento mecânico do material.

De acordo com Chen et al. (2000) e Weingaertner et al. (2001), as tensões residuais na retificação são geradas por três efeitos básicos: a expansão térmica e contração do material durante a retificação, transformações de fases devido às altas temperaturas provindas da usinagem e às deformações plásticas causadas pelos grãos abrasivos do rebolo.

As tensões residuais de tração são criadas, principalmente, por tensões introduzidas pelo ganho térmico e deformações associadas com as temperaturas de retificação. Com isso, seu gradiente acaba ocorrendo da superfície para o interior da peça. Já as tensões de compressão são predominantemente geradas por interações mecânicas dos grãos abrasivos do rebolo com a peça (MALKIN, 1989).

Segundo Monici (2003), analisando-se as tensões residuais, observa-se que as tensões de compressão são favoráveis às propriedades mecânicas do material, pois aumentam a sua resistência à fadiga. Por outro lado, as tensões residuais de tração são danosas, causando a diminuição das resistências mecânica e à corrosão dos materiais, além da redução da resistência ao desgaste a altas temperaturas.

A utilização de rebolos de CBN tem permitido a obtenção de tensões residuais de compressão, devido à redução das temperaturas geradas na retificação em função das menores energias específicas obtidas com tais rebolos devido à alta condutibilidade térmica dos grãos de CBN, contribuindo para a remoção de calor e para a redução do risco de dano térmico no componente retificado (MALKIN, 1989).

A retificação dos aços se dá após o tratamento térmico dos mesmos. O revenimento ocorre devido ao calor do processo de retificação e causa uma diminuição da dureza próximo à superfície acabada (MALKIN, 1989).

Segundo Johnson (1996), as trincas são resultado do excessivo aquecimento durante o processo de retificação. A severidade das trincas pode variar e a sua presença pode até não ser visível imediatamente após a retificação. As trincas reduzem o limite de resistência à fadiga do material, ao mesmo tempo em que aumenta a susceptibilidade da superfície do material ao ataque de processos corrosivos (BIANCHI et al., 2001).

O resfriamento rápido causado pela lubri-refrigeração inadequada pode gerar camadas de martensita, que por serem extremamente frágeis e metaestáveis, são indesejáveis e podem causar defeitos como trincas e variações dimensionais e de propriedades mecânicas nas peças (VIEIRA JÚNIOR et al., 1999).

2.2. REBOLOS

Segundo 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 menos duro.

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

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) (MALKIN, 1989).

2.2.1. Características dos Rebolos

A classificação dos grãos abrasivos é feita em dois grupos: convencionais e superabrasivos. Tal classificação foi baseada na dureza e no desempenho dos materiais. Os grãos abrasivos convencionais apresentam durezas próximas a 2000 kgf/mm^2 , enquanto que os superabrasivos apresentam durezas superiores a 4500 kgf/mm^2 , ambos na escala Knoop.

Como grãos abrasivos convencionais destacam-se o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o carboneto de silício (SiC) (KING & HAHN, 1992). Como grãos superabrasivos encontra-se o diamante e o nitreto de boro cúbico (CBN).

O CBN é utilizado na usinagem de materiais ferrosos, particularmente em aços endurecidos e/ou ligados, uma vez que apresenta maior resistência ao impacto, ao calor e pode ser quimicamente menos reativo do que o diamante.

Os grãos superabrasivos apresentam, segundo Howes et al. (1991) menor desgaste, mas apresentam preços elevados e exigem grandes velocidades de corte.

De acordo com King & Hahn (1986) a dureza do rebolo é indicada pela dificuldade de remoção do grão abrasivo deste. Aglomerantes com maior resistência mecânica tem menor tendência à ruptura quando ocorre o impacto nos grãos abrasivos. Já aglomerantes com maiores resistências ao desgaste dificultam a remoção de abrasivos inteiros uma vez que não ocorre a diminuição da ancoragem dos grãos abrasivos ao longo da vida do rebolo. Tais situações implicam em uma maior dureza dos rebolos. Malkin (1989) considera que rebolos com menor porosidade possuem uma dureza maior uma vez que mais grãos abrasivos estão envolvidos pelo aglomerante.

Na Tabela 2.1 são apresentadas as propriedades de alguns materiais abrasivos.

A estrutura do rebolo indica a concentração volumétrica dos grãos abrasivos no rebolo. Um alto índice indica menor quantidade de abrasivos ou uma estrutura mais aberta.

Tabela 2.1 – Propriedades de alguns materiais abrasivos (MALKIN,1989, adaptada).

Tipo de material abrasivo	Dureza Knoop (kgf/mm²)	Ponto de fusão (°C)	Estrutura Cristalina	Densidade (g/mm³)	Resistência à compressão (kN/cm²)	Cond. térmica (cal/°C.cm.s)
Diamante	8.000	3700	Cúbica	3,52	870	5.0
CBN	4.500	3700	Cúbica	3,48	650	3.3
Óxido de Alumínio	2.500	2040	Hexagonal	3,98	350	0.08
Carbeto de Silício	2.700	2830	Hexagonal	3,22	150	0.2
Carbeto de Tungstênio	2.100	-	Hexagonal	-	350	0.08

De acordo com King & Hahn (1986), uma porosidade ótima para uma dada operação é definida pela relação de compromisso entre uma estrutura suficientemente aberta para permitir a remoção do cavaco bem como a introdução do fluido refrigerante na região de corte por um lado e uma estrutura fechada o suficiente para permitir que um mínimo de partículas abrasivas realizem o corte.

Ressalta-se que uma estrutura fechada, devido ao maior número de grãos em contato com a peça durante o corte, gera melhor acabamento, já que cada grão abrasivo retira um volume menor de cavaco. Em contrapartida, a tendência de empastamento do rebolo e queima

da peça é maior, já que o cavaco dispõe de menor espaço para ser removido da região de corte (Malkin, 1989).

O aglomerante deve apresentar resistência mecânica suficiente para suportar as forças de retificação, temperaturas e forças centrífugas sem desintegrar, ao mesmo tempo em que deve ser resistente ao ataque químico do fluido de corte (MALKIN, 1989).

Para rebolos convencionais existem os seguintes aglomerantes: resinóide, borrachas, silicatos e vitrificados (cerâmicos). Em rebolos superabrasivos os aglomerantes utilizados são resinóides, vitrificados e metálicos, além de existir grãos abrasivos sem aglomerantes, com uma camada de abrasivos depositada eletricamente sobre o material interno do rebolo (MALKIN, 1989).

O desgaste do rebolo é definido como a quantidade de rebolo consumida durante um ciclo ou operação. Pode-se ainda dizer que o desgaste do rebolo é expresso como uma perda volumétrica de material medida pela diminuição diametral.

Existem três mecanismos de desgaste do rebolo, a saber: desgaste por atrito, fratura dos grãos abrasivos e fratura do aglomerante (Figura 2.5).

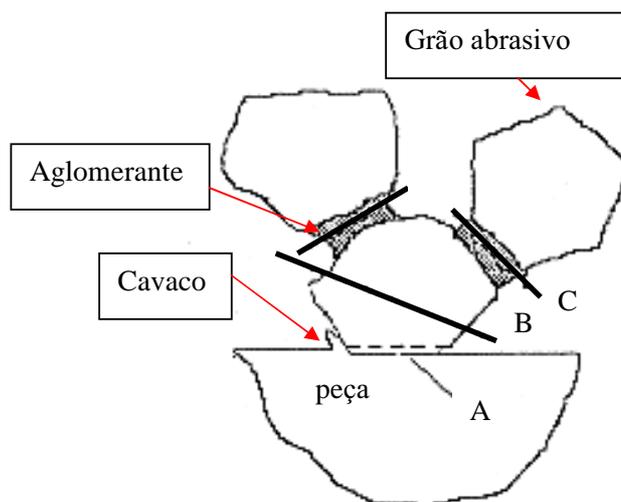


Figura 2.5 – Mecanismos de desgaste do rebolo: A – desgaste por atrito, B – fratura do grão abrasivo e C – fratura do aglomerante devido ao desgaste (MALKIN, 1989).

A definição de Malkin (1989) com relação ao desgaste por atrito é que este envolve a perda de afiação dos grãos abrasivos e crescimento das áreas planas devido ao atrito com o material da peça. A fratura dos grãos abrasivos provoca a remoção de fragmentos destes e a fratura do aglomerante ocorre devido ao desalojamento do grão abrasivo inteiro ocasionado

pelos esforços de corte. Já o desgaste por erosão do aglomerante reduz a ancoragem dos grãos abrasivos, facilitando a remoção destes.

Para a usinagem de peças, os rebolos necessitam de preparação 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 (MALKIN, 1989).

A dressagem consiste em dar forma ao rebolo, com o intuito de fazê-lo girar com o mínimo de erros de batimentos possíveis, bem como dar aos bordos um perfil especial capaz de reproduzir a forma desejada (STEMMER, 1992 e GRAF, 2004). Também é função da dressagem promover uma renovação da camada de grãos abrasivos para o corte.

No avivamento, que é um processo realizado para expor os grãos abrasivos em relação ao aglomerante, é gerada uma determinada exposição dos grãos abrasivos acima do ligante, pela própria remoção. Tal processo é necessário para produzir porosidade necessária ao armazenamento do cavaco durante a retificação (STEMMER, 1992).

Segundo Malkin (1989) o material removido dos rebolos numa operação de dressagem possui uma dimensão maior do que a profundidade de dressagem, porém menor que o grão abrasivo original, indicando na maioria dos casos um mecanismo de fratura dos grãos abrasivos.

Em operações de dressagem são geradas superfícies compostas de macro e micro-efeito definidos como:

-Macro-efeito: formação devida ao formato do dressador, da profundidade de penetração deste e do passo da dressagem. Este fenômeno determina a posição em que as arestas dos grãos abrasivos estão localizadas na superfície do rebolo;

-Micro-efeito: formado pelo arrancamento dos grãos desgastados (com baixa ancoragem na liga) e fratura dos grãos que não se desgastaram por completo, onde novas arestas de corte são geradas pelo dressador.

A Figura 2.6 apresenta a representação do ponto de contato entre dressador e rebolo na operação de dressagem com grandezas envolvidas.

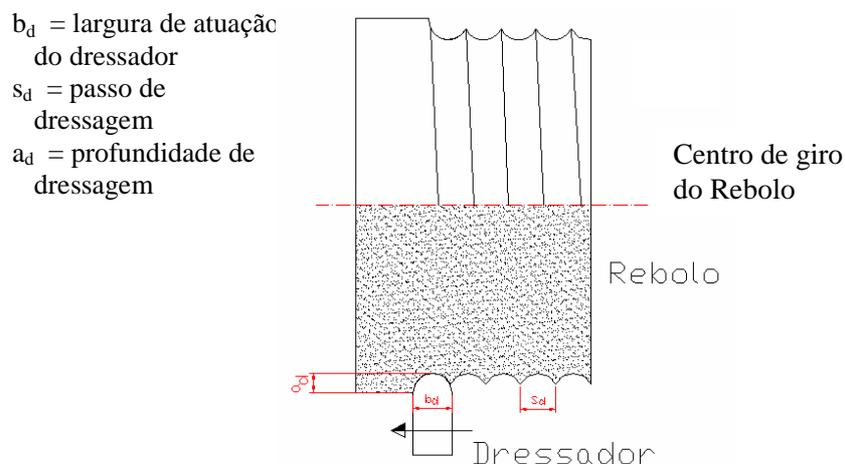


Figura 2.6 – Caracterização de um processo de dressagem, contato rebolo/dressador e principais parâmetros envolvidos no processo (OLIVEIRA, 1988 - adaptada)

O grau de recobrimento (U_d) é um parâmetro criado por König (1980) que relaciona os parâmetros de dressagem e a topografia do rebolo gerada nessa operação. O grau de recobrimento na dressagem com dressador de ponta única determina quantas vezes um ponto da superfície do rebolo é recoberto pela largura útil do dressador e pode ser expresso pela conforme Equação 2.11:

$$U_d = b_d / S_d \quad (2.11)$$

Os resultados obtidos por König (1980) e citados por Oliveira (1989) determinam que quanto menor o grau de recobrimento (até o valor limite de 1), maior a agressividade do rebolo. De acordo com Oliveira (1988), variando-se as condições de dressagem, pode-se utilizar um mesmo rebolo para as operações de desbaste (alta agressividade) e de acabamento (baixa agressividade).

Existem vários tipos de dressadores, empregados nos diversos processos de dressagem existentes. O dressador tipo fliese ou conglomerado, que foi utilizado nesta tese, gera apenas o microefeito no rebolo. Este tipo de dressador consta de uma ferramenta multi-pontas com diamantes naturais aglomerados em liga metálica, e que devido a sua constituição possui grande robustez e durabilidade.

O dressador de ponta única apresenta um diamante central fixado em uma haste metálica. Este tipo de dressador gera macro e micro-efeito no rebolo. No entanto é um

dressador muito susceptível a quebras devido aos elevados esforços que aparecem durante a dressagem.

A Figura 2.7 apresenta os dois tipos de dressadores citados anteriormente (dressador tipo fliese e dressador tipo ponta única).

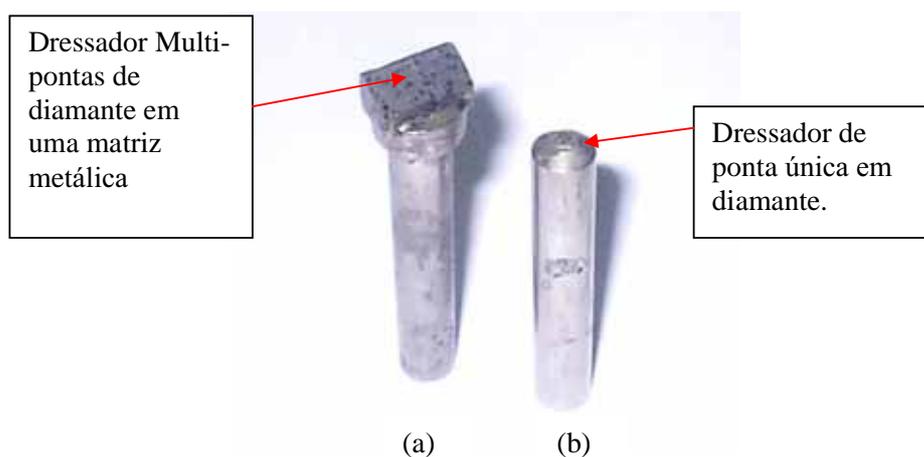


Figura 2.7- a) Dressador tipo Fliese utilizado nesta pesquisa. b) Dressador tipo ponta única.

Segundo a empresa Winter (2004), os dressadores conglomerados servem para a dressagem de rebolos convencionais e superabrasivos, existe uma menor necessidade de substituição em relação ao de ponta única, há uma menor possibilidade de quebra e não há necessidade de manutenção.

Bianchi (1990) relacionou alguns critérios que definem o fim da vida de um rebolo. Estes são:

- aumento excessivo da força de corte: ocorre devido ao desgaste dos grãos abrasivos, uma vez que isto aumenta as áreas planas destes e o entupimento dos poros dos rebolos com cavacos, aumentando os esforços necessários para a remoção de material;

- perda da integridade superficial da peça: com o aumento do atrito, ocorre um aumento da temperatura na região de corte. Caso tal temperatura torne-se excessivamente alta, ocorrerá a queima da peça, com perdas de características mecânicas, trincas ou elevações de tensões residuais. O empastamento e a perda da agressividade do rebolo podem, por sua vez, aumentar a rugosidade da peça retificada;

- erros de forma: o aumento da temperatura na região de corte ocasiona deformações heterogêneas na peça devido às variações na composição e microestrutura. Tais deformações provocam variações na profundidade de corte.

-vibração: a vibração do sistema máquina-rebolo-peça está associada aos fenômenos de auto-excitação que ocorrem. O rebolo desgastado ou empastado de forma não uniforme, trabalhando com rotações constantes, provoca variações na força de corte, tornando-a oscilante. Uma força oscilante gera vibrações que danificam a rugosidade da peça.

2.2.2. Rebolos de CBN

Nos últimos anos, a utilização de rebolos de material superabrasivo, em particular o rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN), vem aumentando significativamente. Segundo Schuitek et al (2001), as principais vantagens do uso deste tipo de rebolo no processo de retificação está em:

- condições de durabilidade do grau de afiação e conseqüentemente do rebolo;
- possibilidades de mergulho para abrir um canal;
- redução substancial dos tempos de preparação e reajustagem de máquina;
- redução das alterações metalúrgicas superficiais; e,
- ganhos em acabamentos superficiais nas peças.

Segundo o fabricante Saint Gobain a relação de consumo brasileira, no ano de 2006, foi de um rebolo de CBN para seis rebolos convencionais.

O nitreto de boro de estrutura hexagonal é obtido pela pirólise do amoníaco de boro e cloro ($\text{BCl}_3 \cdot \text{NH}_3 \rightarrow \text{BN} + 3\text{HCl}$). A transformação para uma estrutura cúbica é obtida em reatores sob pressões que podem chegar a 9000 MPa (90 kbar) e temperaturas de até 2700°C na presença de catalizadores, normalmente lítio (STEMMER, 1992). Apresenta altíssima dureza ($\text{K100} = 4700 \text{ kgf/mm}^2$), independentemente da orientação dos cristais e apresenta vantagens na aplicação quando comparado com o diamante, devido à possibilidade de usinagem de materiais ferrosos.

O CBN foi sinterizado em 1957 por R. H. Wentorf e introduzido comercialmente a partir de 1968. Rebolos de CBN, segundo Stemmer (1992), são usados na retificação de materiais duros como aços rápidos, aços liga temperados, metais duro.

Ainda segundo Stemmer (1992), comparado ao diamante, o CBN apresenta elevada resistência à temperatura, uma vez que apresenta estabilidade, sob pressão atmosférica, até 2000°C.

O rebolo de CBN apresenta velocidade máxima de corte muitas vezes maior que a velocidade de corte de rebolos convencionais. Outra realidade da utilização de rebolos de CBN está na possibilidade de aumento nas velocidades de avanço (BIANCHI, 2000 e ALVES, 2005).

De acordo com Schuitek et al. (2001) os grãos de CBN trabalham com as arestas de corte afiadas em velocidades de corte mais altas porque possuem elevada dureza e não apresentam a diminuição desta com o aumento de temperatura. Em tais velocidades as espessuras de usinagem são menores não causando um desgaste tão acentuado, mantendo a capacidade de corte do rebolo e reduzindo o calor gerado pelo atrito entre grãos cegos e o material da peça.

Normalmente o desgaste dos grãos de CBN na retificação dá-se pelos microlascamentos, gerando assim um grande número de gumes secundários que participam efetivamente da formação do cavaco, sem atritar em demasia com a peça.

Tem-se também um menor desgaste devido ao efeito térmico, uma vez que a condutibilidade térmica do CBN é alta, fazendo com que grande parte do calor gerado no processo seja transmitida aos grãos.

Schuitek et al. (2001) diz que como na retificação com CBN o grau de afiação do abrasivo é mantido por tempos mais longos, necessitando de menos operações de dressagem e perfilamento, e a temperatura resultante na peça é baixa, a dureza na peça dificilmente altera-se e as deformações térmicas são sensivelmente menores, com isto, a ocorrência de tensões residuais de tração que tendem a formar trincas são menores quase sempre não existindo.

Rebolos de CBN tendem a gerar menores temperaturas em função da elevada dureza de seus grãos abrasivos, que mantém a capacidade de corte durante maiores tempos, diminuindo assim o desgaste dos mesmos e reduzindo as parcelas de energias referentes à deformação plástica sem remoção de material (*plowing*) e ao deslizamento de grãos cegos.. Com isto, uma quantidade maior de calor pode ser retirada da região de corte pelo rebolo de CBN, impedindo que este seja transportado para a peça (SILVA NETO & SILVA, 2001).

Devido a seu alto custo, rebolos de materiais superabrasivos são feitos de forma que o material abrasivo e o ligante encontrem-se apenas na camada mais externa.

Os rebolos de CBN apresentam como características as dimensões da camada, o material do corpo, a granulometria, o tipo de ligante e a concentração.

Segundo Bianchi et al. (2000), os rebolos superabrasivos devem ser utilizados quando se deseja qualidade superior e consistente do produto usinado, aumento da produtividade, vida longa da ferramenta de corte e quando for utilizado material de difícil retificação.

Na Tabela 2.2 são apresentados os impactos que ocorrem no rendimento do rebolo de CBN devido às alterações dos grãos e ligantes (BIANCHI et al., 2001).

Tabela 2.2 – Impactos que ocorrem no rendimento de um rebolo superabrasivo de CBN devido às alterações dos grãos e dos ligantes (BIANCHI, et al., 2001).

Alteração Impacto	Friabilidade		Granulometria		Concentração		Dureza (ligante)	
	- Friável ↓	+ Friável ↑	Fina ↓	Grossa ↑	Baixa ↓	Alta ↑	Baixa ↓	Alta ↑
Taxa de remoção de material	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Relação G	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Acabamento superficial	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↓	↑
Consumo de energia da máquina	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↓	↑

Legenda: ↑ melhora ↓ piora

Os rebolos de CBN com ligantes vitrificados, segundo Bianchi et al. (2000), apresentam maiores eficiências, proporcionam melhor acabamento superficial e maior vida que rebolos convencionais e outros tipos de rebolos de CBN. Estas vantagens são afetadas pelo modo como a superfície do rebolo é condicionada, verificada e afiada.

Deve-se considerar que o custo unitário de rebolos de CBN é superior ao dos rebolos convencionais. E, uma vez da sua utilização, maiores cuidados com relação ao manuseio devem ser tomados.

As condições de processo utilizadas são determinantes para um retorno econômico, pois, para aproveitar os menores desgastes dos rebolos de CBN e a possível redução nos tempos principais e de preparação é necessário trabalhar com taxas de remoção de materiais bem superiores às dos rebolos convencionais. Logo, é necessária a utilização de grandes velocidades de corte e de avanço, características presentes apenas em máquinas modernas. A utilização de velocidades de corte baixas implica em um maior desgaste do rebolo de CBN. Outro fator que influencia em um menor rendimento dos rebolos de CBN deve-se ao fato de adaptações realizadas em máquinas não preparadas para o trabalho com este rebolo. Para rebolos de CBN é necessária máquina mais rígida, com maior estabilidade vibracional que garantam que a alta velocidade utilizada não imponha defeitos às peças fabricadas.

2.3. FLUIDOS DE CORTE

A utilização de fluidos de corte na usinagem de materiais começou a ser feita em 1890, por F. W. Taylor. Inicialmente o fluido utilizado foi a água, depois se utilizou a água e soda ou água e sabão, com o intuito de evitar a oxidação da peça/ferramenta.

De acordo com Motta & Machado (1995), Novaski & Rios (2002, 2004) e Nguyen & Zhang (2003), as funções dos fluidos de corte são: remover o calor gerado durante a operação de corte prolongando assim a vida da ferramenta e garantindo a precisão dimensional da peça através da redução de distorções térmicas; retirada do cavaco da região de corte, diminuindo a tendência de entupimentos dos poros do rebolo durante a operação; proteção contra a corrosão; lubrificar a região de contato peça/ferramenta, reduzindo o atrito, minimizando a erosão e o desgaste da ferramenta, aumentando assim sua vida (RUNGE & DUARTE, 1990). A lubrificação pelo fluido de corte reduz as forças envolvidas no processo diminuindo assim a geração de calor na zona de corte.

Os fluidos de corte são utilizados para otimizar a usinagem através do aumento da ação lubrificante e refrigerante na região de corte. A eficiência de um fluido de corte depende da velocidade, da vazão e direção de aplicação (MALKIN, 1989).

A aplicação correta dos fluidos de corte, atingindo a interface peça-rebolo, pode aumentar a produtividade e reduzir os custos das peças fabricadas, com aumento da velocidade de corte, das taxas de avanço e da profundidade de corte. Uma efetiva utilização dos fluidos de corte permite ainda aumentar a vida da ferramenta e precisão dimensional da peça, bem como, diminuir a rugosidade e potência consumida durante o processo de usinagem (MACHADO & DINIZ, 2000).

Segundo Irani et al. (2005), um dos maiores fatores limitantes no processo de retificação é o dano térmico. Este dano pode ser reduzido pela aplicação do fluido de corte que remove o calor criado pela interação da ferramenta através da transferência de calor. Há também uma diminuição de geração de calor decorrente da diminuição do atrito entre a peça e ferramenta, dada pela ação lubrificante do fluido de corte.

Segundo Attanasio et al. (2006), através do fluxo de fluido de corte pode-se retirar os cavacos restantes da zona de corte, reduzindo assim, a possibilidade de dano na peça.

De acordo com Sokovic & Mijanovic (2001), o uso de fluidos de corte aumenta a vida da ferramenta, contribui com uma economia no processo e aumenta a eficiência da produção como um todo.

Segundo Guo e Malkin (1992), a aplicação de fluidos de corte é pouco eficiente nos métodos convencionais, uma vez que a energia armazenada durante a sua aplicação não é suficiente para vencer a força centrífuga do rebolo ou penetrar na barreira de ar que o circunda em movimento.

Como consequência de uma lubrificação ineficiente e de uma refrigeração ruim da interface rebolo-peça ocorre o aumento do número de afiações da ferramenta (perfilamento ou dressagem) ocasionando um maior desgaste do rebolo.

Atualmente estudos e pesquisas são feitos no intuito de otimizar o uso de fluidos de corte. A justificativa para tanto está em diminuir os custos operacionais de produção, viabilizar as questões ecológicas, bem como as leis de conservação do meio ambiente e preservar a saúde do ser humano.

Os principais problemas envolvendo o uso de fluidos de corte em processos de fabricação devem-se ao alto custo do mesmo, os danos que podem trazer aos operadores das máquinas e a poluição ambiental que este pode gerar.

De acordo com Young et al. (1997), todo o custo envolvendo fluidos de corte (compra, reciclagem, manutenção, etc.), chega a representar em até 15% do custo geral do processo.

De acordo com a Portaria 3214/78 NR15 do Ministério do Trabalho, anexo nº. 13, acrescentada pela portaria 14 de 20/12/95 os hidrocarbonetos e seus compostos são considerados substâncias cancerígenas e sua manipulação constitui insalubridade em grau máximo. O risco está associado à ingestão e aspiração.

Malkin (1989) afirma que existe uma diminuição da energia requerida na retificação quando um fluido possui a característica de não apenas dissipar calor, mas também de promover o corte. Segundo Hitchiner (1990), o fluido de corte pode induzir o corte promovendo a afiação do rebolo e reduzindo o coeficiente de atrito e os níveis de forças usadas para determinada taxa de remoção.

Atualmente, novas combinações de rebolo e fluidos de corte estão sendo feitas para uma diminuição da energia gerada durante a retificação, bem como uma melhor dissipação do calor na zona de retificação. A retificação com rebolos de CBN está inclusa em tais combinações (KOHLI, GUO E MALKIN, 1995).

De acordo com Runge & Duarte (1990), os fluidos de corte são agrupados em:

- óleos de corte integrais ou fluidos de corte (integral ou aditivado);
- fluidos de corte solúveis em água:
- emulsionáveis convencionais,

- emulsionáveis semi-sintéticos e
- soluções (fluidos sintéticos)

-gases;

-pastas e lubrificantes sólidos.

A Tabela 2.3 relaciona algumas características dos quatro principais tipos de fluidos de corte: óleo mineral, óleo solúvel, fluidos semi-sintéticos e fluidos sintéticos.

Tabela 2.3 – Características dos principais tipos de fluidos de corte utilizados nas indústrias (WEBSTER, 1995).

	Sintético	Semi-sintético	Óleo emulsionável	Óleo mineral
Calor removido	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Lubrificação	Ruim	Bom	Ótimo	Excelente
Manutenção	Ótimo	Bom	Ruim	Excelente
Filtrabilidade	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Danos - Meio ambiente	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Custo	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Vida do rebolo	Ruim	Bom	Ótimo	Excelente

As emulsões podem sofrer diversos tipos de contaminações que são segundo Runge & Duarte (1990) por bactérias, por fungos, por líquidos estranhos.

O ataque por bactérias é o principal responsável pelo descarte prematuro de uma emulsão, resultado de um controle inadequado do nível bacteriano presente nas mesmas (RUNGE & DUARTE,1990).

Segundo Runge & Duarte (1990), as bactérias devem ser mantidas sob controle, pois é quase impossível manter uma emulsão estéril. Os principais meios pelos quais pode-se manter as emulsões sob controle são: bactericidas, radiação gama, pasteurização e microondas.

Bianchi et al (2005) cita também o controle de bactérias em fluidos de corte através do uso de luz no espectro ultra-violeta.

O descarte de fluido de corte é um processo indesejável devido aos custos envolvidos, (MONICI,1999 e QUEIROZ et al.,1999). No entanto esse descarte é necessário e deve ser realizado seguindo critérios específicos e sempre consultando os órgãos ambientais responsáveis.

2.4. MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO NA RETIFICAÇÃO

Atualmente o uso de sistemas de refrigeração vem se tornando indesejável na produção. A rejeição para tais sistemas está no fato dos altos custos relacionados com o fornecimento e eliminação dos resíduos de refrigeração, bem como no aumento dos esforços adicionais aos sistemas, sendo estes a constante limpeza do chão da fábrica e os cuidados que o operador da máquina deve ter para evitar problemas de saúde (NOVASKI et al., 1999).

Portanto, as pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso de fluidos e/ou lubrificantes na produção industrial. Além dos fatores acima citados, tem-se, dentre outros: custos operacionais da produção, questões ecológicas, exigências legais de conservação do meio ambiente e preservação da saúde do ser humano (MACHADO et al, 2000).

Segundo Machado et al. (2000), para que a utilização de fluidos de corte seja minimizada, duas técnicas têm sido intensamente experimentadas: o corte completamente sem fluido (corte a seco) e o corte com mínima quantidade de refrigeração (MQL), pelo qual uma mínima quantidade de óleo é pulverizada em um fluxo de ar comprimido.

De acordo com Novaski et al. (1999), com a não utilização de refrigerantes, suas funções passam também a não existir. Logo, com a falta de lubrificação, a camada de separação entre a ferramenta e o material não será mais suficientemente garantida e o atrito aumentará. Como consequência para a ferramenta tem-se o aumento do desgaste abrasivo e de adesão. Prevê-se também uma elevação da temperatura no processo. Com o aquecimento, os cavacos terão mais dificuldade para adquirir uma forma mais definida e podem soldar-se à ferramenta. A reduzida refrigeração influencia o comportamento térmico da máquina e, como consequência, a precisão dimensional e geométrica das peças.

Machado et al. (2000) afirma que com baixas velocidades de corte, a refrigeração é relativamente sem importância, enquanto a lubrificação é importante para reduzir o atrito e evitar a formação de arestas postiça de corte, portanto, um fluido a base de óleo deve ser utilizado.

Em altas velocidades de corte, as condições não são favoráveis para a penetração do fluido na interface para que ele exerça o papel lubrificante. Nestas condições, a refrigeração torna-se mais importante e deve-se utilizar um fluido de corte à base de água. Como lubrificante, o fluido de corte age para reduzir a área de contato cavaco-ferramenta. A sua eficiência vai depender da sua habilidade de penetrar na interface cavaco-ferramenta, no pequeno espaço de tempo disponível, e de formar um filme, seja por ataque químico ou por adsorção física, com resistência ao cisalhamento menor do que a resistência do material da

interface.

Algumas vezes, a usinagem a seco promove a substituição de alguns processos. Quando da não possibilidade de eliminação total de refrigeração utiliza-se o processo denominado quase-refrigeração, com o emprego da técnica de Mínima Quantidade de Lubri-Refrigeração (MQL) (NOVASKI et al., 1999).

A técnica de mínima quantidade de lubrificação (MQL) consiste numa mistura de óleo e ar comprimido que formando uma névoa é aplicada na região do corte, no lugar da convencional inundação de fluidos de corte, miscíveis ou imiscíveis em água.

Segundo Novaski et al. (1999), no MQL, uma quantidade mínima de fluido é aplicada com o auxílio de uma pressão de ar. Esta pequena quantidade de fluido é suficiente para reduzir o atrito no corte, diminuindo a tendência à aderência em materiais com tais características. Embora a utilização de fluidos não seja completamente eliminada com esta técnica, os custos com limpeza e armazenamento de emulsões são diminuídos.

A técnica de MQL surge como a alternativa mais coerente, já que combina a funcionalidade da refrigeração (ar comprimido) com um consumo muito baixo de fluido de corte, geralmente de 10 até no máximo 100ml/h a uma pressão de 4,0 a 8,0 kgf/cm².

Segundo Klocke & Einsenblätter (1997) e Young et al. (1997), existem muitas vantagens na utilização da MQL se comparado com a refrigeração convencional como a redução da potência de retificação e energia específica, além da melhora da qualidade superficial e do menor desgaste do rebolo.

De acordo com Atanásio et al. (2006), no sistema de mínima quantidade de lubrificação, a lubrificação é executada pela névoa de óleo direcionada, enquanto que a refrigeração é efetuada pelo jato de ar comprimido. Existem várias vantagens com a aplicação deste método. O ajuste da mistura é muito fácil de ser controlada. Outras vantagens do MQL são: o barateamento na limpeza da peça final e a capacidade de visualização do processo, já que o local da usinagem não é inundado pelo fluido de corte como na técnica de refrigeração convencional.

Para a técnica da MQL os óleos de base vegetal estão cada vez sendo mais empregados. Estes óleos, inalados com a formação do aerossol, diminuem o risco à saúde. Em virtude deste risco, o ambiente de névoa formado deve ser o menor possível. Como medida de precaução, alguns sistemas são oferecidos enclausurados na carenagem. Também é possível instalar um sistema de aspiração na região de trabalho (NOVASKI et al., 1999).

Já segundo Heisel et al. (1998), as possibilidades adicionais para a redução de lubrificantes de refrigeração são o uso de materiais e aditivos compatíveis com o meio ambiente e com base não-nociva.

Com a utilização da mínima quantidade de refrigeração, houve a concretização de alguns problemas relacionados com o meio ambiente e com a saúde do operador, tais como:

- poluição ambiental: a pulverização levanta no ambiente de trabalho partículas de óleo que exigem cuidados especiais. É exigido uma máquina totalmente fechada, com guardas de proteção e um bom sistema de exaustão com controle de emissão de partículas (MACHADO et al., 2000);

- consumo: a aplicação do fluido por névoa é considerado sem retorno, com perda total do fluido (MACHADO et al., 2000);

- barulho: na pulverização é utilizada uma linha de ar comprimido que funciona intermitentemente durante todo o processo. Essas linhas de ar geram ruídos que geralmente ultrapassam os limites admitidos pelo ouvido humano (<80dB). Portanto, além de afetar a saúde do trabalhador, o barulho polui o ambiente e prejudica a comunicação (MACHADO et al., 2000).

Segundo Heisel et al. (1998), existe vantagens na utilização de sistemas MQL comparados com sistemas convencionais:

- em relação ao volume da peça usinada, a quantidade de fluido utilizada na MQL é muitas vezes menor do que na lubri-refrigeração convencional;

- materiais de filtragem e reciclagens de manutenção dos lubrificantes podem ser evitados;

- as peças que passam por este processo de usinagem ficam quase secas, sendo que desta forma, uma operação de lavagem é quase sempre desnecessária;

- devido ao baixo conteúdo de óleo restante no cavaco, a sua recuperação não é justificável;

Uma grande vantagem é que a aplicação de biocidas e preservativos pode ser eliminada, pois apenas a quantidade de fluido de corte que será utilizada em um turno de trabalho deverá ser colocada no reservatório do sistema.

Vários estudos vêm sendo realizados na tentativa de diminuir a quantidade de fluido usado nos processos de fabricação. Silva et al. (2004) relata a eficiência da aplicação do processo de MQL na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 temperado e revenido, quando comparada à aplicação convencional (alta vazão e baixa pressão de aplicação) onde foram encontrados valores satisfatórios. Klocke et al. (2000b) cita

que a mínima quantidade de lubrificação reduziu as forças tangenciais e normais de corte bem como as rugosidades usando uma vazão de 215 ml/h para a MQL. A velocidade de corte do rebolo foi de 100m/s e o material foi o aço 100Cr6V.

Ressalta-se que estas pesquisas aplicando a MQL no processo de retificação são de elevada importância para o meio industrial, porém são recentes e ainda necessitam de estudos mais aprofundados.

Na Figura 2.8 é apresentado o diagrama esquemático de um sistema de mínima quantidade de lubrificação.

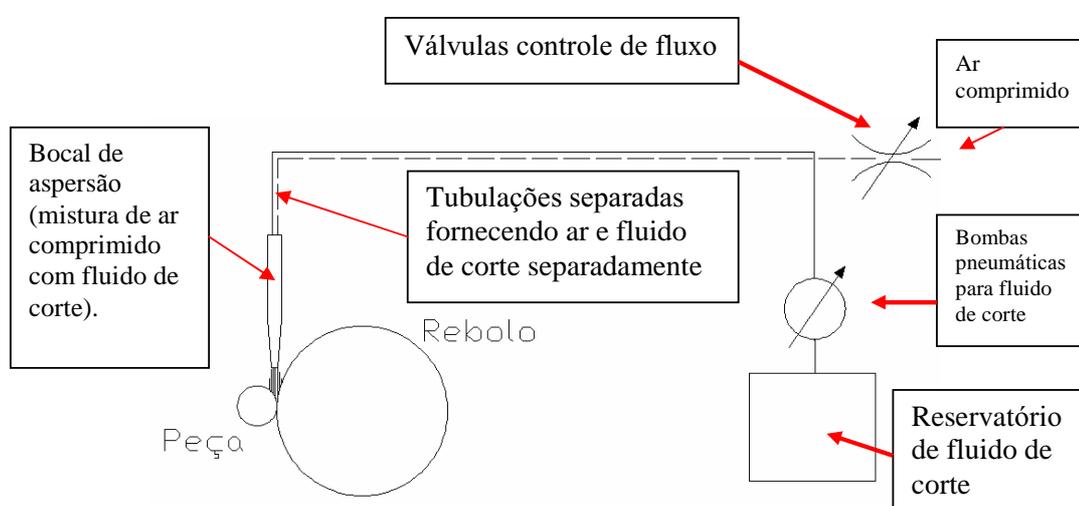


Figura 2.8 - Diagrama Esquemático de um Sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação (HEISEL et al., 1998, adaptada).

Diante do exposto quanto às dificuldades em se realizar a correta manutenção e descarte dos fluidos de corte presentes nos processos de usinagem, tem-se que uma das tendências mundiais é o emprego de uma quantidade racional do mesmo no processo (SIMON, 1999; BRAGA et al. 2000).

2.5. A TÉCNICA DA REFRIGERAÇÃO OTIMIZADA.

A refrigeração otimizada consiste na otimização da quantidade de fluido de corte, através da utilização de bocais aplicadores mais eficientes, do melhor posicionamento dos bocais aplicadores e do aumento da pressão (velocidade) do fluido de corte.

Segundo Ebbrell et al. (1999), a otimização do processo aumenta a capacidade de lubri-refrigeração dos fluidos, promovendo a remoção de cavaco mais facilmente e gerando

menores dispersões na região de corte. Contudo, para isto é necessário um correto posicionamento dos bocais para efetuar a aplicação do fluido de corte de forma eficiente.

Existem alguns fatores que afetam diretamente a eficiência da aplicação do fluido de corte, incluindo-se o tipo e a velocidade do fluido utilizado, o posicionamento do bocal, o ângulo de abertura do bocal, o projeto do bocal e o tamanho dos grãos abrasivos do rebolo (CAMPBELL, 1995).

Segundo Ebbrell et al. (2000), quanto a problemas particulares no processo de retificação, existe a alta velocidade do rebolo, que provoca uma barreira de ar na periferia deste. Esta barreira de ar impede o fluxo do fluido de corte para zona de corte do material. Não se acredita que os métodos convencionais de aplicação de fluidos de corte via bocais convencionais façam o fluido quebrar esta barreira e penetrar na zona de corte totalmente. Desse modo, boa parte do fluido é defletido, ficando dispersa à zona de corte.

Segundo pesquisa realizada por Webster (1995), a velocidade com que o fluido penetra na região de corte pode minimizar os possíveis impactos fluido/ferramenta. Fato verificado também por Alves (2005). Isto foi verificado quando a velocidade do fluido é igual à velocidade periférica do rebolo. Neste caso, o fluido tende a penetrar na região de corte, com a mesma velocidade do grão abrasivo, não havendo assim interferências significativas por parte do grão abrasivo durante a remoção de material.

Grande número de pesquisas vem tratando a questão da igualdade entre velocidade de corte com velocidade do fluido. Um desses resultados é o modelo de bocal proposto por Webster et al. (1995), demonstrado na Figura 2.9.

Segundo Irani et al. (2005), uma das vantagens desses tipos de bocais é a redução da turbulência no fluido de corte, maior velocidade do jato de fluido e maior precisão no foco da zona de corte.

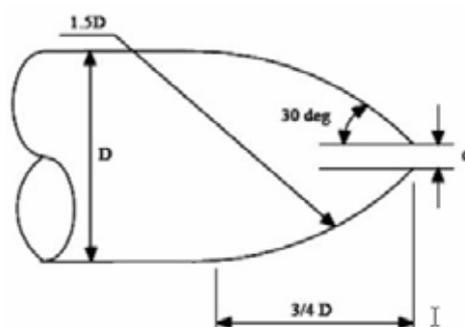


Figura 2.9- Modelo proposto por Webster et al.(1995).

Irani et al. (2005) fez uma pesquisa sobre os trabalhos de bocais mais eficientes e listou alguns tópicos sobre o melhor projeto de construção do bocal, entre eles têm se que o acabamento da superfície do bocal deve ser liso e côncavo; deve ter bordas afiadas na saída; o bocal deve ter uma elevada relação de contração da entrada à saída; quinas e mudanças bruscas no diâmetro devem ser evitadas; a performance não é muito sensível ao ângulo do bocal, contanto que o jato seja direcionado à região de corte; pode-se não haver necessidade de um bocal perfilado desde que haja um grande bocal redondo eficiente ou vários bocais redondos eficientes pequenos; uma tubulação reta colocada entre o condicionador de fluxo e a saída do bocal é necessária para provocar uma condição de velocidade e fluxo uniforme. Estes conceitos foram utilizado na fabricação do bocal otimizado utilizado nesta pesquisa.

2.6. ESTUDOS QUANTO A FORMAS DE APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE E QUANTO A UTILIZAÇÃO DE CBN.

Neste item são tratadas algumas pesquisas recentes desenvolvidas no Laboratório de Usinagem por Abrasão envolvendo a utilização de rebolos de CBN e diferentes formas de aplicação de fluido de corte.

Silva (2004), utilizando rebolos de superabrasivos de CBN com 25% de concentração de granulometria muito fina e rebolos convencionais de óxido de alumínio na retificação cilíndrica externa de mergulho, pesquisou o comportamento da técnica de mínima quantidade de lubrificação MQL comparando-a a refrigeração convencional na retificação do aço ABNT 4340 temperado e revenido. Em seus ensaios foram variadas a vazões de fluido de corte e de ar comprimido no sistema MQL e utilizou-se uma vazão de 8,4 l/min para a lubrificação convencional. Seus resultados apontaram que a técnica MQL, para as condições utilizadas, resultou em melhorias satisfatórias quando comparadas à refrigeração convencional sendo capaz de ser utilizada no processo de retificação.

Alves (2005), em pesquisa que estudava a influência da velocidade de mergulho no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho utilizando o conceito de refrigeração otimizada usando bocal circular proposto por Webster (1995) com diâmetro de saída do bocal de 4 mm e largura de retificação de 3mm observou que a técnica otimizada proporcionou ganhos significativos em relação aos parâmetros metrológicos, dimensionais e geométricos para a retificação do aço ABNT D6 com dureza média de 62 HRc. Utilizou-se um rebolo de CBN com grande concentração de material abrasivo (36%) com granulometria finíssima.

Observou ainda, que para as condições utilizadas, as maiores velocidades de saída do jato de fluido de corte no sistema otimizado apresentou os melhores resultados.

Em pesquisa realizada por Catai (2004) onde utilizou rebolo superabrasivo de CBN com 36% de material abrasivo e rebolos convencionais com refrigeração otimizada usando bocal circular proposto por Webster (1995) com diâmetro de saída do bocal de 4 mm e refrigeração convencional na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço VC131 com largura de retificação de 3mm e com a utilização de defletores para a camada de ar formada em torno do rebolo, observou que para as maiores velocidades de saída do fluido de corte, nas condições testadas, obteve-se peças mais precisas .

Observando as pesquisas já realizadas notou-se a importância de pesquisar as formas de lubri-refrigeração no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho em condições possíveis de serem realizadas no meio industrial com a utilização de rebolos superabrasivos com baixa concentração de abrasivos. Nesta Tese estudou-se a retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 com dureza média de 54HRc através da utilização das técnicas de lubri-refrigeração otimizada, MQL e convencional e através da variação das condições de cada técnica. Buscou-se ainda baratear o processo através da utilização de rebolos de CBN com 15% de material abrasivo. Para criar condições possíveis de serem empregadas pelas indústrias desenvolveu-se um novo bocal para a aplicação otimizada capaz de atender uma largura de retificação de 12mm que se aproxima muito das condições reais utilizadas pelas empresas. Além disso, buscou-se utilizar fluidos de corte de origem vegetal, que ainda se encontram em fase de desenvolvimento pelos seus fabricantes e que ainda apresenta pouca penetração no ramo industrial. Estes fluidos proporcionam menos danos à saúde e à natureza.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo é apresentado o detalhamento do banco de ensaios utilizado para as medições de algumas variáveis de saída (força tangencial de corte, energia específica de retificação, emissão acústica, rugosidade, desgaste diametral do rebolo, circularidade, microdureza e tensão residual), perante os diversos parâmetros de entrada utilizados (velocidade de corte, velocidade de mergulho, dressagem do rebolo, rotação da peça e do rebolo e formas de aplicação do fluido de corte). Também são apresentados os materiais e a metodologia empregada para a análise microestrutural através de microscopias eletrônicas de varredura (MEV).

Inicialmente são citados os parâmetros de entrada e variáveis de saída a serem analisadas e posteriormente será apresentada a forma como foi montado o banco de ensaios e quais foram os procedimentos e metodologia empregados neste trabalho.

3.1 PARÂMETROS DE ENTRADA

Nesta pesquisa utilizaram-se três formas distintas de aplicação de fluido de corte, onde foram usados o método convencional (MC) com 2 bocais circulares fornecidos junto com a retificadora cilíndrica Sulmecânica, o método de mínima quantidade de lubrificante (MQL) com um bocal devidamente preparado para este tipo de aplicação e o método otimizado (MO) com um bocal especialmente desenvolvido de forma a abranger toda a superfície a ser retificada. Utilizou-se um rebolo superabrasivo de CBN e os diversos parâmetros de corte (variação da velocidade de aplicação do fluido de corte no MO, variação da vazão de fluido de corte no MQL).

A seguir são apresentados e caracterizados todos os componentes e parâmetros de entrada que foram utilizados nesta pesquisa.

3.1.1 Fluidos de corte

Inicialmente é importante salientar que ambos os fluidos de corte utilizados nesta Tese foram escolhidos em parceria com fabricantes renomados destes tipos de produtos. A escolha baseou-se em utilizar fluidos que apresentam menores riscos à saúde e ao meio ambiente. Os fluidos escolhidos ainda apresentam pouca utilização no ramo industrial e ainda continuam em fase de desenvolvimento. Desta forma, foram utilizados os seguintes fluidos de corte:

- Óleo emulsionável de base vegetal (a base de ésteres sintéticos), com especificação DMS 3200 F-1 Lote 0193/06-S do fabricante Shell do Brasil S.A. usado para aplicação pelo método convencional e pela técnica otimizada. Usou-se uma concentração de 5% e pH 9. Segundo o fabricante, O fluido DMS 3200 é um fluido sintético com elevado poder de lubrificação, solúvel em água, recomendado para usinagens severas de metais ferrosos. Contém aditivos de extrema pressão, anticorrosivo, passivador de metais e bactericida. Ainda segundo o fabricante, proporciona a substituição de óleos solúveis de base mineral e do tipo EP devido ao seu desempenho e elevada lubricidade. Confere alta vida à ferramenta e melhora o acabamento das peças por conter agentes de extrema pressão. Apresenta alta resistência à degradação microbiológica. Oferece maior segurança em relação à saúde e meio ambiente por ser isento de nitritos e fenóis.
- O fluido de corte utilizado para o MQL foi o Accu-Lube LB 1000 Lote 39540 do fabricante ITW Chemical Products Ltda, que é um óleo vegetal com aditivos de extrema pressão para operações severas, antioxidantes e biodegradável.

O óleo emulsionável de base vegetal a base de ésteres sintéticos foi adotado já que, segundo a fabricante do óleo emulsionável, este tipo de fluido de corte é uma alternativa bastante promissora e adequada para processos de usinagem de aços endurecidos. A grande vantagem do óleo emulsionável vegetal à base de ésteres é que o mesmo apresenta alta lubricidade, aliado a um alto poder de refrigeração.

3.1.2 Controle dos fluidos de corte

O controle microbiológico do fluido de corte foi realizado com bactericida *ADEP 30* à base de Triazina fornecido pelo fabricante Shell do Brasil S.A. cujo princípio ativo é a triazina da família dos formaldeídos ou doadores de formol. Sua ação é predominantemente bactericida com baixo efeito fungicida. Apresenta resposta rápida e baixo efeito residual. Segundo o fabricante Shell do Brasil S.A. o óleo emulsionável de base vegetal (a base de ésteres sintéticos), com especificação DMS 3200 F-1 Lote 0193/06-S usado para aplicação pelo método convencional e pela técnica otimizada apresenta em sua formulação 3% de bactericida. Para emulsões deve-se adotar uma dosagem de 0,05 a 0,1% de bactericida. De preferência deve-se manter a dosagem final do princípio ativo em torno de 1000 a 1500 ppm.

Segundo a Shell do Brasil S.A., em sistemas com contaminação elevada, a Triazina rapidamente é consumida e não mantém seu efeito por tempo muito prolongado. Para solucionar esta questão adotou-se como critério efetuar a limpeza do reservatório de fluido de

corte fazendo sua desinfecção antes da preparação da emulsão.

Segundo a Shell do Brasil S.A., como a emulsão foi preparada com uma concentração de 5% de fluido de corte e como o fluido de corte apresenta 3% de bactericida sendo que 80% do bactericida é formado pelo princípio ativo Triazina, a emulsão inicialmente preparada apresenta uma concentração de 1200 ppm de triazina. Essa concentração encontra-se dentro da faixa recomendada pelo fabricante. Nesta pesquisa usou-se a concentração máxima recomendada de 1500 ppm. Para se atingir este valor adicionou-se 600ml do bactericida em 80 litros de emulsão.

A presença de espuma nos fluidos de corte traz sérias conseqüências no monitoramento da sua vazão acarretando em uma medição errada. A presença de espuma também pode acarretar na cavitação da bomba centrífuga do sistema de lubri-refrigeração. Para se evitar a formação de espumas no fluido de corte durante a operação de retificação usou-se o *antiespumante para óleos solúveis* fornecido pela empresa fabricante Shell do Brasil S.A. composto por uma mistura de siloxano glicol copolímero, polialkileno polímero e poliglicol. A recomendação do fabricante consiste em utilizar o antiespumante na concentração de 0,005% a 0,01% na emulsão final. Foram usados 800 ml para 80 litros de emulsão inicial. O antiespumante foi pré-diluído antes de ser adicionado na emulsão final impedindo a formação de grumos de antiespumante mal dispersos que tendem a aglutinar nos cantos do reservatório e da máquina retificadora.

3.1.3 Ferramenta de corte

Os ensaios foram realizados com rebolo de superabrasivos de CBN (nitreto de boro cúbico) fabricado com ligante vitrificado e concentração de 15% de volume de CBN com as seguintes características: 350 x 20 - 5 x 127 – SNB151Q12VR2 – lote 7936, ou seja, com diâmetro externo de 350mm, 20 mm de largura com 5 mm de espessura de material abrasivo de CBN e 127 mm de diâmetro interno. A granulometria dos grãos abrasivos presentes neste rebolo, segundo a FEPA, está entre 100 e 120 mesh classificado como granulometria fina. A granulometria dos abrasivos, segundo Stemmer (1992), é dada como muito grossos (6 a 12 mesh), grossos (14 a 24 mesh), médios (30 a 60 mesh), finos (70 a 120 mesh), muito finos (150 a 320 mesh) e finíssimo (400 a 1200 mesh) sendo que os grãos mais grossos são usados para corte e limpeza e os mais finos usados para polimento e lapidação. Quanto a capacidade de retenção dos grãos abrasivos o rebolo utilizado é classificado como duro. A estrutura do rebolo utilizado, que refere-se ao espaçamento entre os grãos é definida como aberta. O rebolo superabrasivo foi fornecido pela empresa Nikkon Ferramentas de Corte Ltda. As

condições de dressagem foram mantidas constantes nos ensaios.

3.1.4 Métodos utilizados para aplicação de fluido de corte

3.1.4.1 Método convencional

A lubri-refrigeração convencional é caracterizada pela aplicação do fluido de corte a baixa pressão e com uma alta vazão. O bocal utilizado neste sistema de lubri-refrigeração é composto por dois bicos difusores, cada um com 6,3 mm de diâmetro para a saída do fluido.

A Figura 3.1 apresenta o sistema convencional de aplicação de fluido de corte com dois bocais circulares. Pode-se observar também o jato de fluido de corte formado e o posicionamento da peça e sensor de emissão acústica.



Figura 3.1 – Sistema convencional para aplicação de fluido de corte, com dois bicos difusores em operação.

A concentração da emulsão utilizada foi verificada através do refratômetro portátil do fabricante ATAGO modelo N-1E, e o pH através do peagômetro Hanna.

Devido à largura da região da peça ser de 12 mm optou-se pela utilização de dois bocais para que toda a superfície de contato peça e rebolo fosse atingida pelo fluido de corte com uma vazão de 20l/min. Controlou-se essa vazão através de um sistema formado por um medidor de turbina e um display digital que será discutido a frente (item 3.1.4.4).

Como proteção, durante os ensaios foi usado um protetor em Policarbonato (material de alta resistência a choques) à frente da retificadora.

3.1.4.2 Método da mínima quantidade de lubrificação (MQL)

O sistema MQL é composto basicamente de: compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador (equipamento de MQL) e bocal projetado para a utilização de MQL na retificação. O equipamento de mínima quantidade de lubrificante permite uma fina regulagem do volume de lubrificante/ar separadamente, por meio de um registro tipo agulha.

A Figura 3.2 mostra a unidade de controle do equipamento de MQL, onde são feitas a dosagem do óleo lubrificante e a regulagem da vazão de ar comprimido.

A Figura 3.2 apresenta detalhadamente os elementos constituintes da unidade de controle do equipamento de MQL

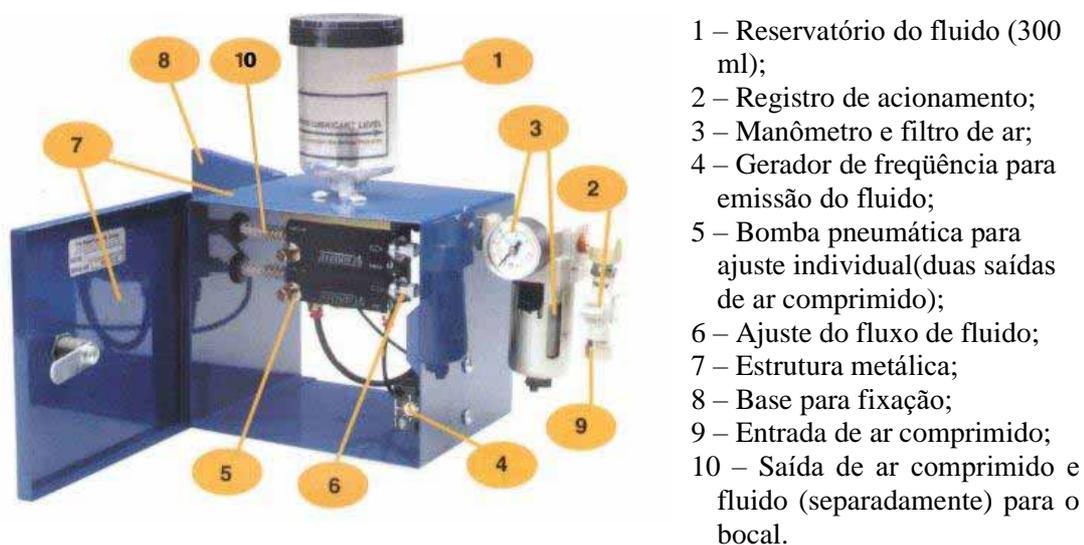


Figura 3.2 – Detalhes construtivos do aplicador ITW Accu-lube 79053D.

A utilização deste equipamento necessita de uma linha de ar comprimido com filtros e reguladores de pressão abastecida por um compressor de ar. A Figura 3.3 apresenta a linha de ar comprimido utilizada. Deve-se observar nesta figura a presença de um medidor de vazão de ar comprimido conectado a um display (marcador) digital. Através desse sistema controlava-se a vazão, e conseqüentemente a velocidade, de aplicação do ar comprimido.

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

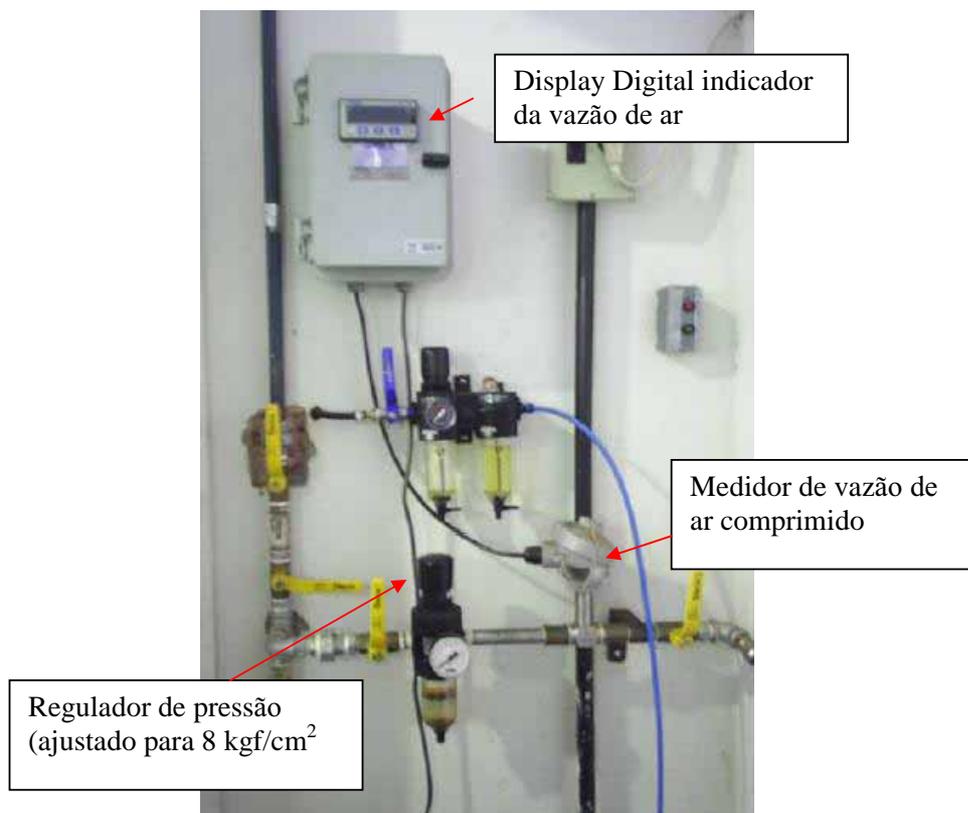


Figura 3.3 – Esquema de montagem da linha de ar comprimido

A Figura 3.4 apresenta o circuito hidro-pneumático do sistema MQL de lubri-refrigeração.

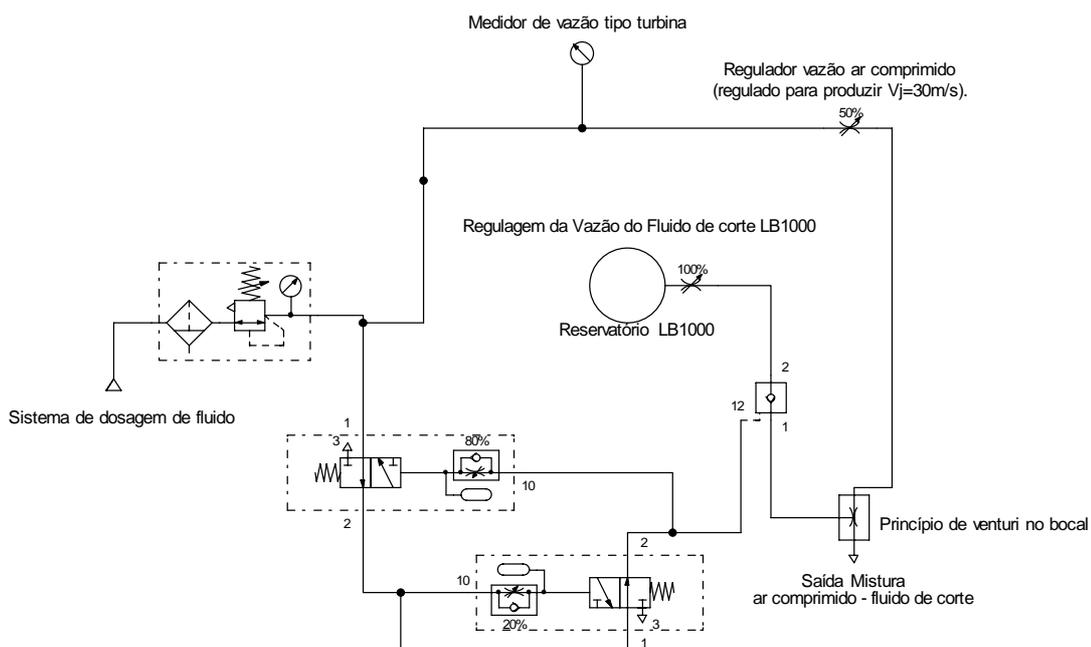


Figura 3.4 – Circuito hidro-pneumático do Sistema MQL utilizado.

Na Figura 3.5 encontra-se o bocal utilizado no método MQL no processo de retificação. O bocal possui várias entradas de ar através de furos externos. Estes furos externos estão conectados a mangueiras independentes externas. Possui ainda 2 (duas) entradas de fluido de corte através de dois furos internos que recebem fluido de duas mangueiras independentes passadas internamente pela mangueira de ar comprimido (Figura 3.6). O bocal possui ainda uma câmara interna para uma correta mistura do ar comprimido com o fluido de corte através do princípio de Venturi. A saída da mistura fluido/ar comprimido ocorre em uma saída retangular. O bocal foi construído em latão.



Figura 3.5 – Vistas do bocal utilizado na experimentação com MQL.

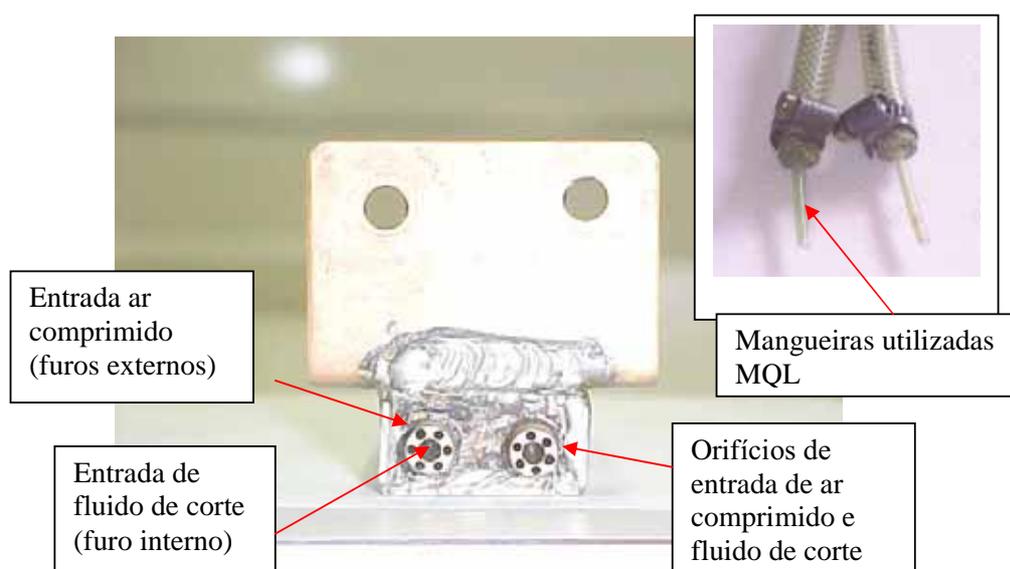


Figura 3.6 – Vista da parte traseira do bocal MQL mostrando os orifícios de entrada de ar comprimido e fluido de corte.

Na Figura 3.7 é apresentada a forma de instalação do bocal utilizado na experimentação com MQL mostrando a ligação de ar comprimido. Na Figura 3.8 apresenta-se o desenho do bocal usado para a aplicação do fluido de corte pelo método da mínima quantidade de lubrificante (MQL) no processo de retificação.

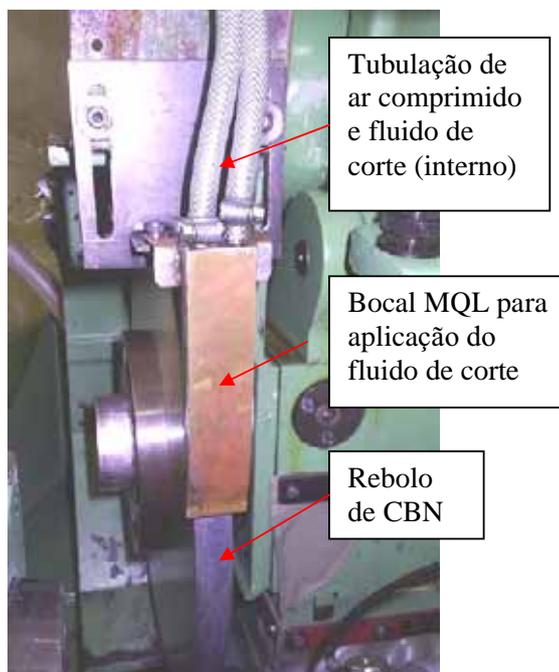


Figura 3.7 – Vista do bocal utilizado na experimentação com MQL instalado na Retificadora mostrando a ligação de ar comprimido.

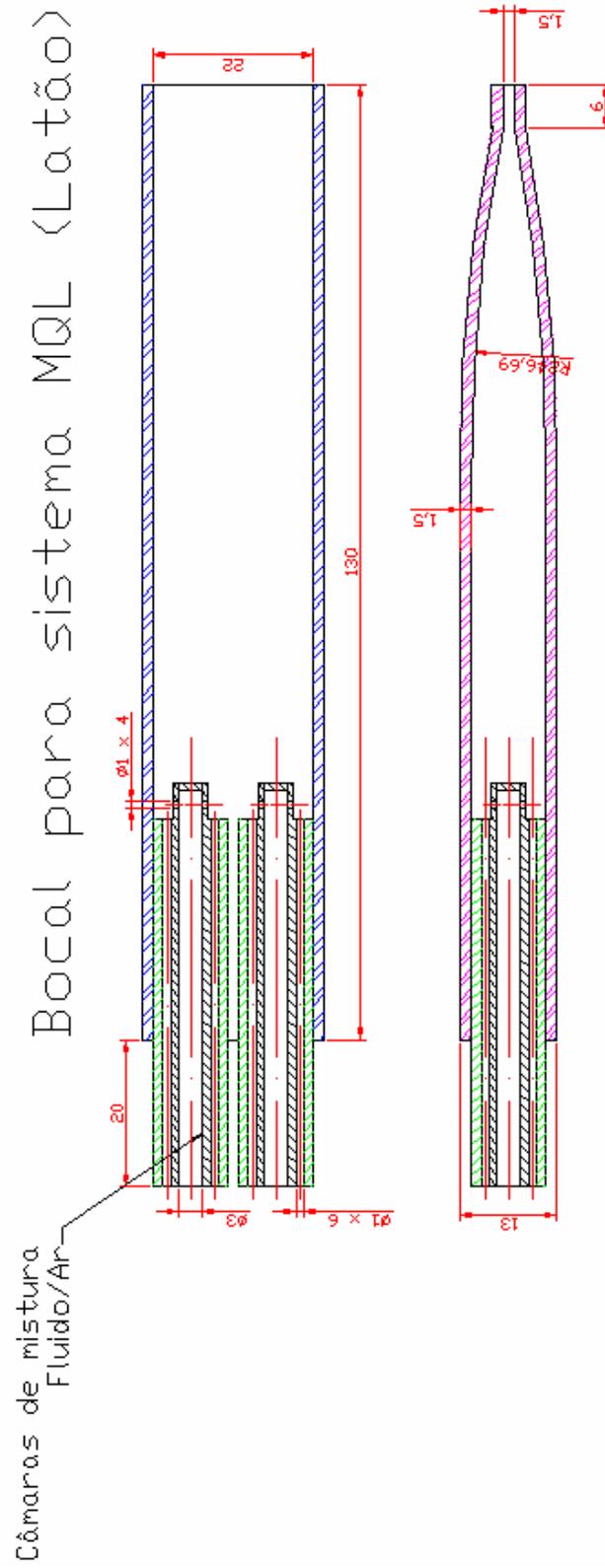


Figura 3.8 – Desenho do bocal MQL (SILVA, 2004).

Convém ressaltar que a quantidade de fluido de corte (vazão) usada nos experimentos desta pesquisa usando MQL foi calibrada através de um recipiente graduado. Como procedimento de medição preparou-se no recipiente graduado dois orifícios onde foi introduzida somente a mangueira interna por onde saia apenas o fluido de corte sem a interferência do ar comprimido. Dessa forma o ar comprimido não entrava dentro do recipiente e não prejudicava a medição da vazão. Assim, a cada regulagem realizada nas válvulas controle de vazão de fluido de corte, colocava-se o sistema em operação e media-se por um determinado tempo a quantidade de fluido depositado no recipiente graduado. Este procedimento foi realizado até se obter a vazão necessária e requerida para os ensaios (80ml/h, 60ml/h e 40ml/h). O sistema para a medição da vazão de fluido de corte no sistema MQL é apresentado na Figura 3.9.



Figura 3.9 – Sistema para a medição da vazão de fluido de corte no sistema MQL.

A Figura 3.10 apresenta a realização de um ensaio com o sistema MQL com vazão de 40 ml de fluido de corte LB 1000. Conforme já citado, como proteção, durante os ensaios utilizou-se um protetor de Policarbonato (material de alta resistência a choques) à frente da retificadora fazendo com que a imagem apareça com aparência desfocada devido à presença de fluido de corte nesta proteção.

Após a realização de ensaios com a técnica MQL o corpo de prova usinado apresentava temperaturas altas não permitindo a retirada do corpo de prova diretamente com as mãos.



Figura 3.10 – Ensaio com sistema MQL. Aparência desfocada devido a proteção de policarbonato.

3.1.4.3 Método Otimizado

O terceiro método de aplicação de fluidos de corte, denominado de sistema otimizado, foi composto basicamente por um bocal otimizado construído a partir de um bocal MQL.

Ensaios preliminares indicaram a necessidade de se colocar um elemento (tubo retangular) na saída de fluido do bocal de forma a tornar o jato de fluido de corte menos disperso. Foi introduzido na saída do bocal um tubo retangular fabricado com chapa aço ABNT 1010 galvanizada cujo formato foi conseguido através da fabricação de dois perfis “U” encaixados um ao outro. Posteriormente este tubo retangular formado por dois perfis “U” foi soldado (solda Prata) à saída do bocal (ver Figura 3.11).

Devido à perda de carga gerada e à limitação de vazão da bomba centrífuga da máquina retificadora, a construção do bocal foi feita de forma a se atingir a maior velocidade de saída de fluido de corte usada nesta pesquisa para o sistema otimizado ($V_j=30\text{m/s}$). As dimensões internas determinadas do tubo retangular necessárias para se conseguir tal velocidade são: 13mm de largura por 1,1mm de espessura. Na parte externa foram deixados 3 mm de tubo para se poder soldar o bocal. Os 13 mm de largura foram necessários para que o jato de fluido cobrisse toda a largura de retificação de 12 mm.

A Figura 3.11 mostra o desenho do bocal otimizado fabricado e usado nesta pesquisa.

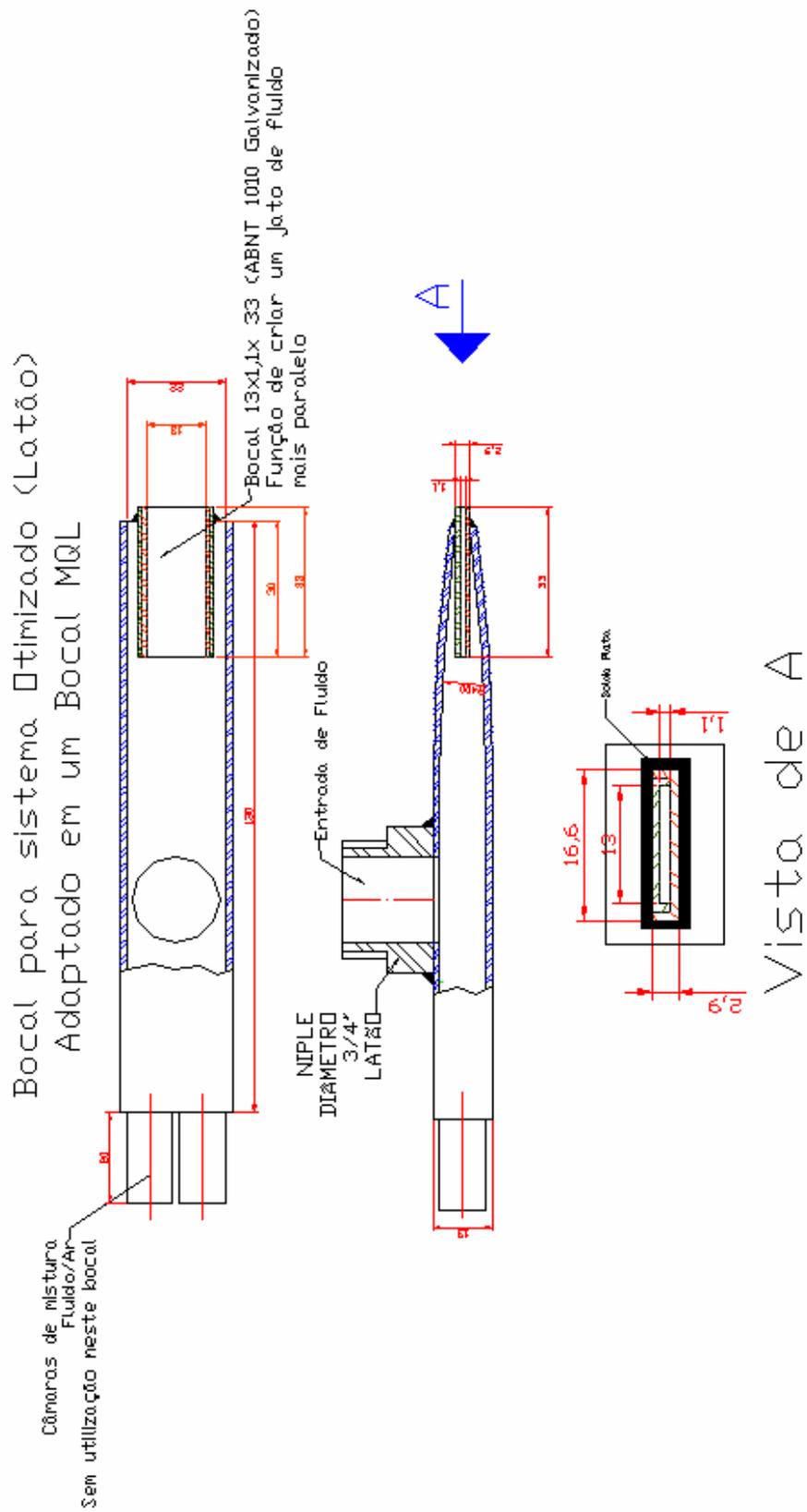


Figura 3.11 – Projeto do bocal Otimizado construído (Projeto adaptativo).

O posicionamento do bocal otimizado desenvolvido na retificadora é apresentado na Figuras 3.12. Pode-se observar ainda o posicionamento do corpo de prova entre pontas girando através da placa de arraste.



Figura 3.12 – Formação do jato de fluido de corte com o Bocal Otimizado.

A formação do jato de fluido de corte no método otimizado pode ser verificada na Figura 3.13. O direcionamento do fluido de corte foi feito de maneira que o jato atingisse precisamente o ponto de contato do corpo de prova com o rebolo.

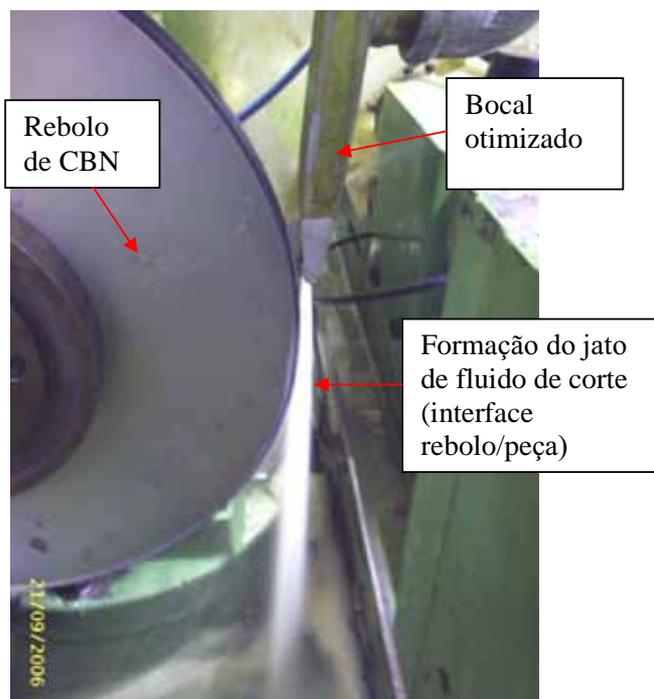


Figura 3.13– Formação do jato de fluido de corte com o Bocal Otimizado (vista lateral).

3.1.4.4. Sistema de regulagem de vazão para sistema otimizado e convencional

O controle da vazão de fluido de corte nos métodos convencional e otimizado foi realizado através de um sistema de medição de vazão inserido após a bomba centrífuga responsável por bombear fluido de corte. Neste sistema, o controle de vazão foi realizado através de válvulas de esfera posicionadas antes do bico de saída do fluido de corte e antes do medidor de vazão. À medida que se abria ou fechava o registro, o valor da vazão era aferido e mostrado no display do aparelho medidor de vazão modelo SVTG DMY-2030, Contech.

Tomou-se o cuidado de colocar o medidor tipo turbina afastado da válvula de esfera presente antes do medidor e mais afastado ainda da bomba centrífuga. Segundo o fabricante esse cuidado deve ser tomado para que os valores indicados no display sejam confiáveis, pois dessa forma evita fluxos turbulentos.

Este medidor de vazão do tipo turbina fornece uma leitura direta da vazão em litros por minuto (l/min). O funcionamento ocorre por meio de um campo magnético que é gerado de acordo com a rotação da turbina.

As vazões adequadas utilizadas nos ensaios definitivos foram determinadas em ensaios preliminares e se encontram no item 3.1.5 desta tese. Na Figura 3.14 é apresentado o arranjo de instalação do medidor de vazão para as técnicas otimizada e convencional.

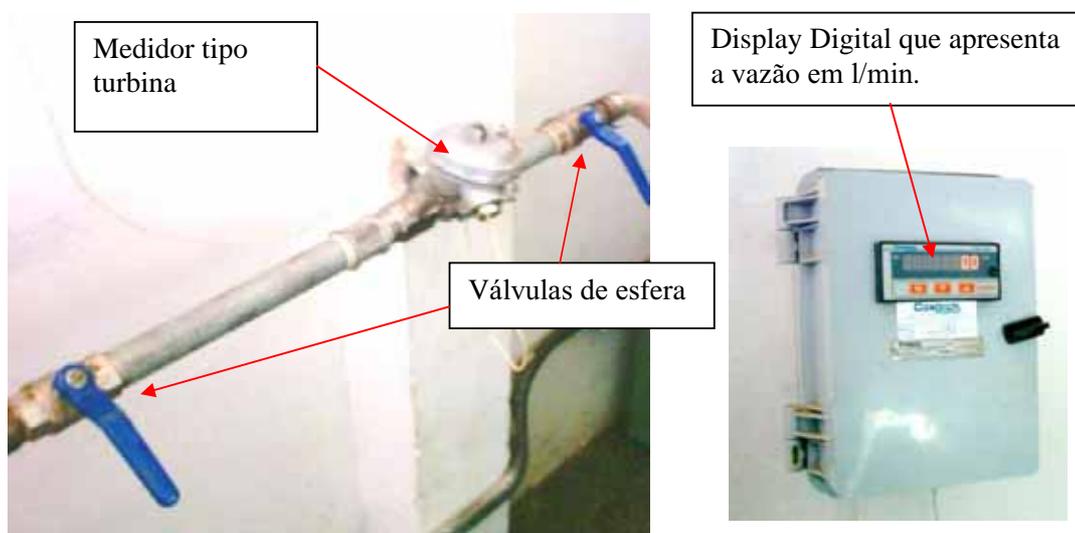


Figura 3.14 – Medidor de vazão DMY-2030, da marca CONTECH para o controle do fluxo de fluido de corte.

3.1.5. Parâmetros de corte

As condições de usinagem utilizadas nos ensaios definitivos foram definidas através dos ensaios preliminares para que se pudesse chegar a valores que melhor caracterizassem o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho empregado dentro das indústrias. As condições que foram mantidas constantes em todos os ensaios (MQL, otimizada e convencional) 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 8 segundos;
- Largura de retificação de 12 mm;
- Modo de dressagem;
- Ciclos de retificação igual a 100;
- Espessura de corte equivalente máxima (h_{eq}) de 0,065 μm ;
- Espessura de corte equivalente mínima (h_{eq}) de 0,047 μm .

Tais parâmetros também foram escolhidos de acordo com as condições de usinagem permissíveis para a máquina retificadora utilizada para a realização dos ensaios.

Em relação aos parâmetros de corte, variou-se ao longo dos ensaios a velocidade de

aplicação do fluido de corte V_j na aplicação otimizada e a vazão de fluido de corte na aplicação com mínima quantidade de lubrificante mantendo-se a velocidade de saída de ar comprimido em 30m/s.

O jato de fluido de corte no caso da condição otimizada teve cinco diferentes velocidades de saída. Na aplicação com a técnica de MQL foram usadas 3 vazões de fluido de corte. Na aplicação convencional usou-se apenas uma vazão que foi a máxima possível no sistema.

Nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 são apresentadas respectivamente as condições de velocidades e vazões de saída do fluido de corte na condição otimizada, MQL e convencional. Cabe ressaltar que a concentração do fluido de corte utilizado na técnica otimizada e convencional foi mantida constante em 5%.

Tabela 3.1 – Velocidades e vazões utilizadas na aplicação com a técnica otimizada.

Condição	Vazão total de fluido de corte (l/min)	Velocidade de saída do fluido de corte, V_j (m/s)
Otimizada 30m/s	26,3	30
Otimizada 27m/s	23,7	27
Otimizada 25m/s	21,9	25
Otimizada 20m/s	17,5	20
Otimizada 15m/s	13,2	15

Tabela 3.2 – Vazões utilizadas na aplicação MQL.

Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)	Vazão total de fluido de corte (l/min)	Velocidade de saída do ar comprimido V_j, (m/s)
MQL 40ml/h	0,00067	30
MQL 60ml/h	0,00100	30
MQL 80ml/h	0,00133	30

Tabela 3.3 – Vazões e velocidades utilizadas na aplicação convencional.

Aplicação convencional	Vazão total de fluido de corte, (l/min)	Velocidade de saída do fluido de corte, V_j, (m/s)
Convencional	20	5,3

3.2 VARIÁVEIS DE SAÍDA DO PROCESSO

As variáveis medidas em tempo real foram adquiridas no momento em que o processo de retificação se desenvolvia. São elas: Força tangencial de corte, energia específica de retificação; emissão acústica.

Já as variáveis mensuráveis ou analisáveis pós-ensaios, ou seja, aquelas que foram medidas ou analisadas depois da retificação dos corpos de prova são: Rugosidade; desgaste diametral do rebolo; desvios de circularidade; tensão residual; microdureza; análise microestrutural por MEV.

A metodologia para análise das variáveis é apresentada no item 3.4 e 3.8 desta Tese.

3.3 PROCEDIMENTOS INICIAIS

3.3.1 Confeção dos corpos de prova

Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos diferentes de corpos de prova. O primeiro tipo refere-se ao corpo de prova usado para a realização dos ensaios propriamente dito, utilizado para a realização dos ensaios de desgaste de 100 ciclos de retificação, retirando-se 0,1 mm do diâmetro da peça por ciclo de retificação. Neste corpo de prova foram realizadas as medições em tempo real da força tangencial de corte, energia específica, emissão acústica. Também foram realizadas neste corpo de prova as medições posteriores aos ensaios (rugosidade, desvio de circularidade, tensão residual e análise por microscopia).

O material utilizado na confecção desses corpos de prova foi o aço ABNT 4340, temperado e revenido. Esse aço é muito utilizado na fabricação de peças que exigem boa combinação de resistência e tenacidade, com valores relativamente uniformes em toda a seção. Essas propriedades são obtidas através do beneficiamento do aço através de têmpera e revenimento. A penetração das propriedades nos aços beneficiados depende principalmente de uma propriedade intrínseca, a temperabilidade, e de outros fatores como a geometria da peça e a severidade de têmpera.

Os corpos de prova em aço ABNT 4340 foram dimensionados com 37 mm de diâmetro com um rebaixo de 22 mm de diâmetro. A região usada nos ensaios tem uma largura de 12mm(Figura 3.19). Antes da construção dos corpos de prova foi determinada a forma de fixação dos mesmos, realizada entre pontas para minimizar futuros desvios de circularidade provenientes de uma má fixação.

A composição química do aço utilizado na pesquisa (ABNT 4340) esta apresentada na

Tabela 3.4. A Figura 3.15 apresenta a forma do corpo de prova.

Após a confecção dos corpos de prova, os mesmos foram temperados e revenidos pela empresa Brasimet Comércio e Indústria Ltda passando a apresentar uma dureza média de 54 HRc.

O formato escolhido para os corpos de prova visava fazer com que apenas parte do rebolo fosse usada no ensaio possibilitando dessa maneira a medição do desgaste do rebolo. As dimensões usadas permitiram que a troca das peças fosse feita de forma rápida sem a necessidade de mudanças no sistema de contra-pontas e de dressagem.

Tabela 3.4 – 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



Figura 3.15 – Geometria do corpo de prova em aço ABNT 4340 temperado e revenido

A forma de fixação do corpo de prova é apresentada na Figura 3.16. Pode-se observar o corpo de prova preso a uma placa de arraste e fixado entre pontas. Pode-se notar ainda o uso de graxa entre o corpo de prova e a contra-ponta. Este cuidado deve-se ao fato da contra-ponta ser fixa e não poder girar. Dessa forma existe um movimento relativo entre peça e contra-ponta e a graxa serve como lubrificante diminuindo a atrito nesta região e diminuindo as interferências no processo.

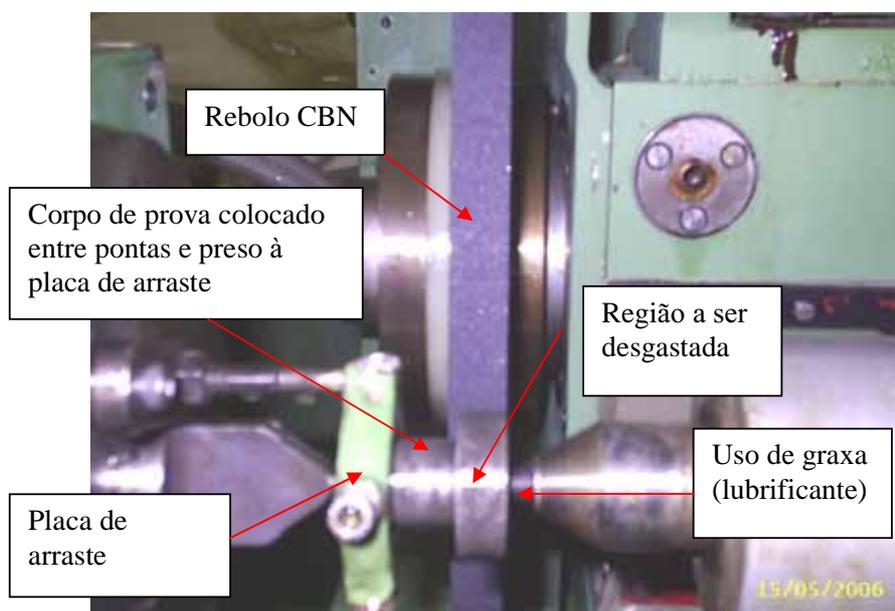


Figura 3.16 – Sistema de fixação do corpo de prova temperado e revenido antes de ser retificado.

O segundo tipo de corpo de prova refere-se ao corpo de prova usado para a realização da marcação do perfil desgastado do rebolo após os ensaios. Neste corpo de prova foi realizada a medição indireta do desgaste diametral do rebolo para cada ensaio realizado.

O material utilizado na confecção desse segundo tipo de corpos de prova foi o aço ABNT 1045 não temperado. A escolha desse aço deve-se ao fato de ser um aço dúctil quando não temperado. Dessa forma não contribui significativamente com o desgaste do rebolo no momento da marcação do perfil desgastado.

Para a marcação do perfil desgastado realizou-se apenas um ciclo de retificação com a retirada de 0,1mm no raio da peça.

Os corpos de prova para a marcação do desgaste do rebolo foram dimensionados com 37 mm de diâmetro com um comprimento de 40mm. Essas dimensões possibilitaram que a troca de corpos de prova no momento dos ensaios fosse feita rapidamente sem a necessidade de movimentação do cabeçote de contra-ponta e do sistema de dressagem. Ou seja, o sistema montado para a realização dos ensaios propriamente dito foi o mesmo para a marcação do perfil desgastado do rebolo.

A Figura 3.17 apresenta a forma do corpo de prova fabricado em aço ABNT 1045 usado para a marcação do perfil desgastado do rebolo.



Figura 3.17 – Geometria do corpo de prova usado para a marcação do desgaste do rebolo

A forma de fixação do corpo de prova em aço ABNT 1045 usado para a marcação do perfil desgastado do rebolo é apresentada na Figura 3.18. Pode-se observar o corpo de prova preso a uma placa de arraste e fixado entre pontas. Neste corpo de prova não há rebaixas. Utilizou-se também graxa entre o corpo de prova e a contra-ponta. Pode-se observar ainda a região onde é marcado o perfil do rebolo.



Figura 3.18- Sistema de fixação do corpo de prova (ABNT 1045) pra marcação do desgaste do rebolo

Os corpos de prova foram confeccionados, na Oficina Mecânica da UNESP de Bauru, respeitando-se as tolerâncias pré-determinadas no desenho.

A Figura 3.19 apresenta as dimensões finais dos corpos de prova que foram utilizados nesta pesquisa. A região a ser retificada apresenta uma largura de 12 mm.

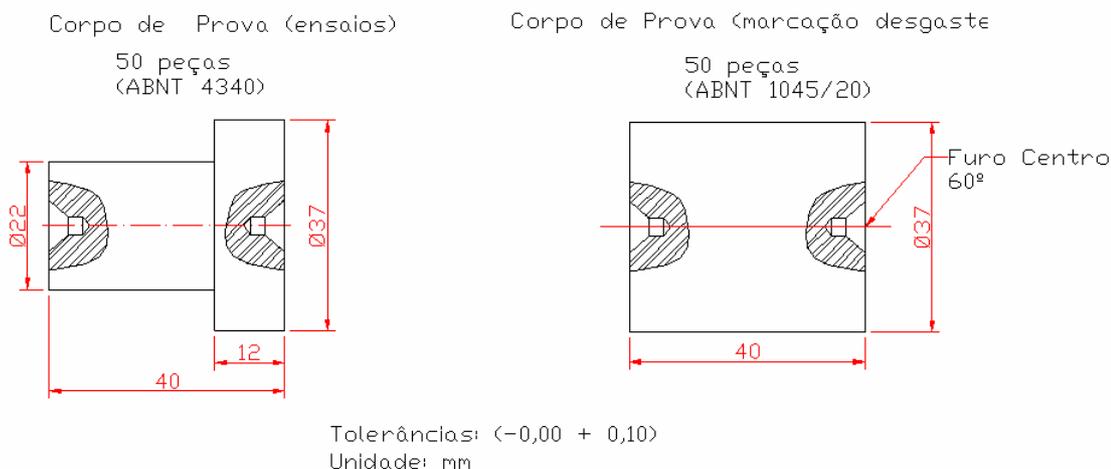


Figura 3.19 – Desenho dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa.

3.3.2 Dressagem dos rebolos

Neste trabalho, a operação de dressagem do rebolo superabrasivo de CBN foi mantida constante para todos os ensaios, não influenciando as variáveis de saída do processo. Realizou-se uma dressagem antes de cada ensaio.

O rebolo foi dressado com um dressador tipo fliese da marca Master Diamond (Figura 3.20). A penetração do dressador na superfície de corte do rebolo, a cada passada durante o processo de dressagem foi de 1 μm medido no diâmetro da peça. Realizaram-se inúmeras passadas até que todo o perfil do rebolo fosse dressado. A Figura 3.20 apresenta 2 (dois) dressadores tipo fliese, sendo que um apresenta-se desgastado após várias operações de dressagem.



Figura 3.20 – Dressadores Tipo Fliese usados nesta pesquisa.

A Figura 3.21 apresenta a disposição dos equipamentos para a realização do processo de

dressagem, mostrando em detalhe o cabeçote para a colocação do dressador. O dressador apresenta haste cilíndrica que se encaixa em um orifício no cabeçote dressador. A fixação do dressador é realizada por um parafuso M6 (rosca métrica com diâmetro externo de 6mm) tipo sextavado interno (Allen).

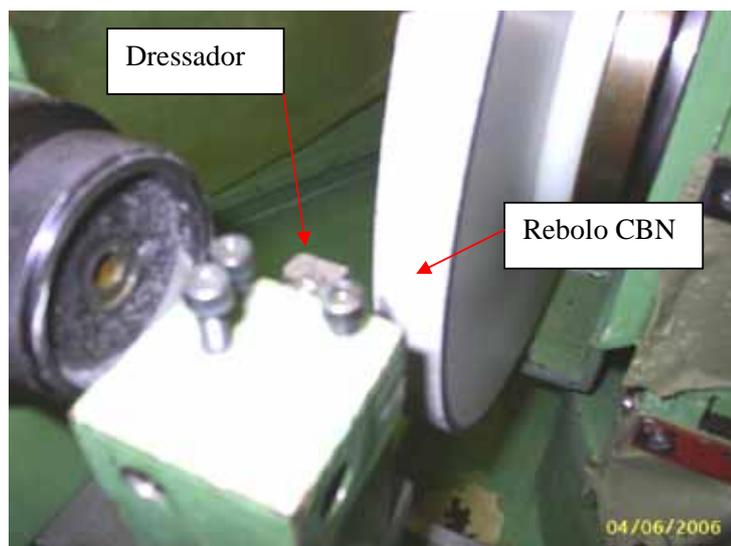


Figura 3.21 – Esquema da montagem do dressador fliese (vista lateral).

3.3.3 Preparação dos fluidos de corte

De acordo com as informações do fabricante do óleo emulsionável de base vegetal (a base de ésteres sintéticos), a concentração indicada e utilizada no processo de retificação em questão foi de 5,0 %, com pH mantido em torno de 9,0. Fluido este usado no método convencional e otimizado.

3.3.4 Classificação dos ensaios

Nesta pesquisa foram retificadas 50 peças, sendo 15 mediante a aplicação de MQL, 25 com lubri-refrigeração otimizada, 5 peças foram retificadas sob a condição convencional e 5 sob a condição a seco(sem lubri-refrigeração). Estes ensaios de queima foram realizados com o intuito de comparar as peças retificadas pelos três métodos (MO, MC e MQL) e observar problemas que geralmente ocorre em peças queimadas.

No método MQL foi variada a vazão de fluido de corte (40ml/h, 60ml/h e 80ml/h) mantendo-se constante a velocidade de saída do ar comprimido em 30m/s. Para o sistema otimizado foi variada a velocidade de saída do jato de fluido de corte (15m/s, 20m/s, 25m/s,

27m/s e 30m/s). Para o sistema convencional foi mantida a vazão de fluido de corte em 20l/min.

3.3.4.1 Seqüência de ensaios

Na Figura 3.22 é apresentada a seqüência dos ensaios. Foram realizados 5 ensaios (repetições) para cada vazão (Q) de fluido de corte no método MQL e para cada velocidade de saída de fluido de corte (V_j) no sistema Otimizado para que os valores obtidos possam ser representativos. No sistema convencional utilizou-se apenas uma vazão.

As condições usadas para todos os ensaios são apresentadas de forma esquemática na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Características dos ensaios

Ensaio	Rebolo	Dressador	Forma de Lubri-refrigeração	Velocidade de Rebolo	Fluido de corte
1 a 5	Superabrasivo CBN NIKKON O.S. 7936	Conglomerado tipo friese	Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) 80 ml/h de fluido de corte, Velocidade de saída do ar 30m/s.	30m/s	LB 1000 LUB. Lote 39.540 PARA USINAGEM SEVERA DE METAIS FERROSOS
6 a 10	Superabrasivo CBN NIKKON O.S. 7936	Conglomerado tipo friese	Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) 60 ml/h de fluido de corte, Velocidade de saída do ar 30m/s.	30m/s	LB 1000 LUB. Lote 39.540 PARA USINAGEM SEVERA DE METAIS FERROSOS
11 a 15	Superabrasivo CBN NIKKON O.S. 7936	Conglomerado tipo friese	Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) 40 ml/h de fluido de corte, Velocidade de saída do ar 30m/s.	30m/s	LB 1000 LUB. Lote 39.540 PARA USINAGEM SEVERA DE METAIS FERROSOS
16 a 20	Superabrasivo CBN NIKKON O.S. 7936	Conglomerado tipo friese	OTIMIZADA Velocidade de saída do jato de fluido = $V_j = 30$ m/s	30m/s	SHELL DMS 3200 lote 0193/06-S , 5% CONCENTRACAO
21 a 25	Superabrasivo CBN NIKKON O.S. 7936	Conglomerado tipo friese	OTIMIZADA Velocidade de saída do jato de fluido = $V_j = 27$ m/s	30m/s	SHELL DMS 3200 lote 0193/06-S , 5% CONCENTRACAO
26 a 30	Superabrasivo CBN NIKKON O.S. 7936	Conglomerado tipo friese	OTIMIZADA Velocidade de saída do jato de fluido = $V_j = 25$ m/s	30m/s	SHELL DMS 3200 lote 0193/06-S , 5% CONCENTRACAO
31 a 35	Superabrasivo CBN NIKKON O.S. 7936	Conglomerado tipo friese	OTIMIZADA Velocidade de saída do jato de fluido = $V_j = 20$ m/s	30m/s	SHELL DMS 3200 lote 0193/06-S , 5% CONCENTRACAO
36 a 40	Superabrasivo CBN NIKKON O.S. 7936	Conglomerado tipo friese	OTIMIZADA Velocidade de saída do jato de fluido = $V_j = 15$ m/s	30m/s	SHELL DMS 3200 lote 0193/06-S , 5% CONCENTRACAO
41 a 45	Superabrasivo CBN NIKKON O.S. 7936	Conglomerado tipo friese	CONVENCIONAL 20 l/min	30m/s	SHELL DMS 3200 lote 0193/06-S , 5% CONCENTRACAO
46 a 50*	Superabrasivo CBN NIKKON O.S. 7936	Conglomerado tipo friese	SEM lubri-refrigeração (Ensaio de queima)	30m/s	-

* Usado somente para análise de Microscopia Eletrônica de Varredura, microdureza e tensão residual.

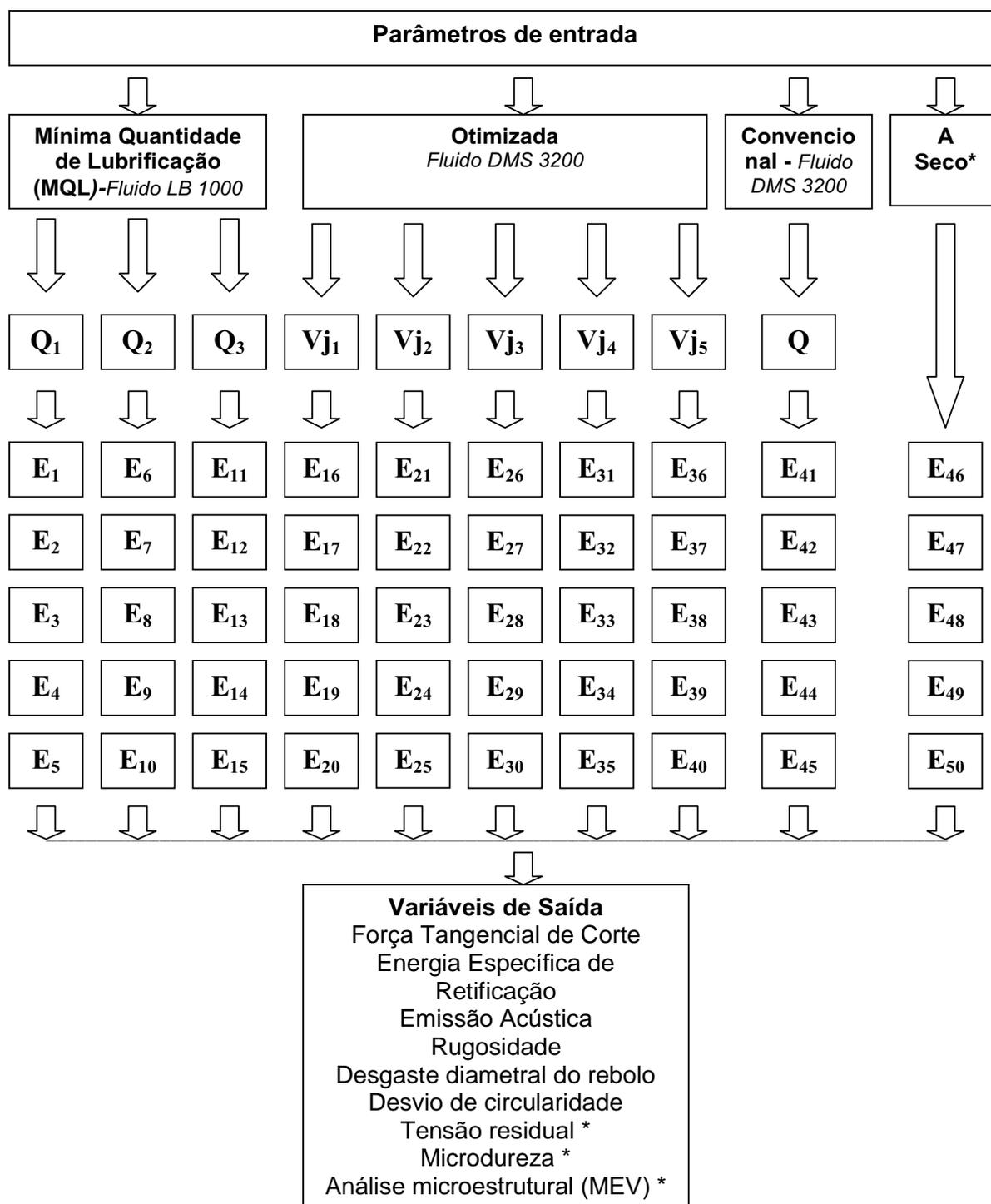


Figura 3.22 – Seqüência dos ensaios realizados.

Na Figura 3.23 é apresentado o fluxograma de realização dos ensaios mostrando com mais detalhes todos os procedimentos realizados nesta Tese.

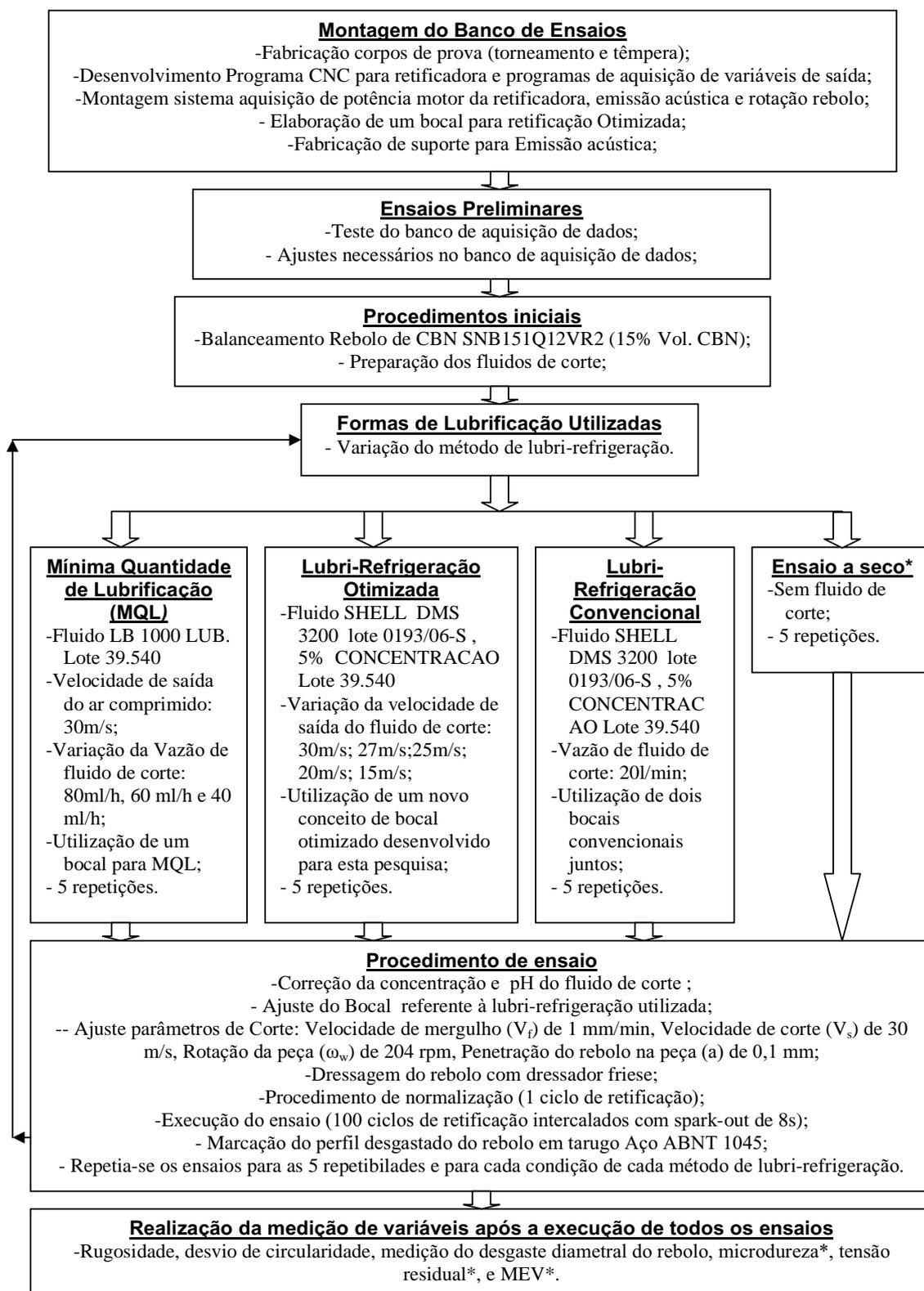


Figura 3.23-Fluxograma do projeto.

3.4. PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PARA MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS MONITORADAS EM TEMPO REAL

O banco de ensaios utilizado para a realização dos ensaios laboratoriais foi composto de uma retificadora cilíndrica da marca SULMECÂNICA, modelo RUAP 515 H-CNC equipada com um comando numérico computadorizado CNC da marca Fagor.

3.4.1. Aquisição da força tangencial de corte e energia específica de retificação

Nesta pesquisa, a força tangencial de corte F_{tc} foi medida pela determinação da potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo, com o monitoramento dos valores de tensão e corrente elétrica, provenientes deste motor elétrico.

Para isso, um circuito eletrônico, denominado Curvopower, foi projetado e construído pelo grupo de pesquisa em usinagem por abrasão da faculdade de Engenharia de Bauru, 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 e manipulados pelo programa de aquisição de dados, que foi desenvolvido, utilizando-se o software LabView 6.1®, da National Instruments®.

A força tangencial de corte foi obtida por meio da aquisição de potência elétrica e rotação do rebolo durante a execução do ensaio, a qual visava fornecer a mínima quantidade de erros possíveis, pois no sistema ocorrem perdas, como atrito nos mancais de rolamento, sistema de correias e no motor de indução etc. A taxa de amostragem utilizada foi de 2.000 amostras por segundo a fim de realizar uma ilustração efetiva do processo.

Destaca-se que o processo de calibração da potência elétrica, desenvolvido pelo grupo de pesquisa em usinagem por abrasão, consiste em instalar lâmpadas incandescentes e resistências de aquecedor cujas potências eram conhecidas e medidas por um watímetro analógico do fabricante LIER, com fundo de escala de 1200W e resolução de 25W. O nível de tensão referente à potência do módulo CurvoPower (Figura 3.24) foi medido por um multímetro digital do fabricante Minipa, modelo ET-2400. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 3.6.

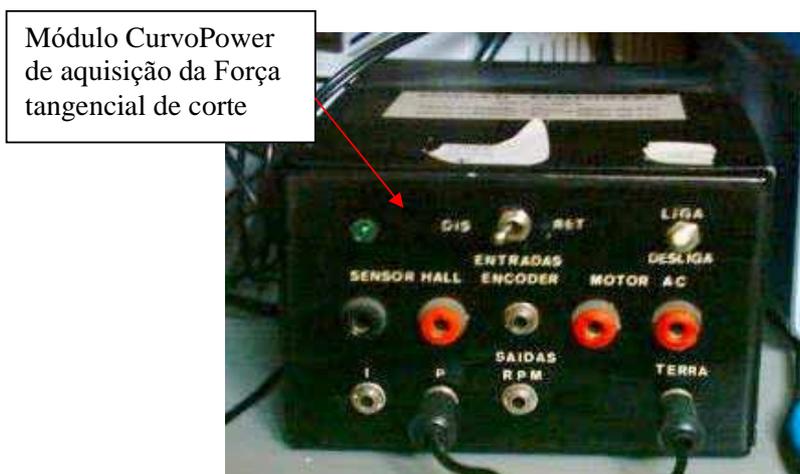


Figura 3.24 – Circuito eletrônico (CurvoPower) para aquisição da força tangencial de corte

Tabela 3.6 – Valores de potência elétrica e tensão para obtenção da curva de calibração da potência elétrica

Potências (W)	Tensão lida no multímetro (mV)
0	10,4
100	125,6
200	243,8
310	367,5
425	488
530	606
625	713
725	811
850	892
925	958
975	986
1125	1051

Com os valores da Tabela 3.6, construiu-se o gráfico da potência em função da tensão de saída do módulo condicionador de sinal para se encontrar a equação de calibração através do programa MatLAB® 6.5. Através de regressão linear determinou-se a Equação de calibração (3.1):

$$P_{elet} = 1,0236V - 52,805 \quad (3.1)$$

Onde: P_{elet} é potência elétrica do circuito calibrado;

V: é a tensão na saída do circuito condicionador de sinais;

A curva de calibração mostra que a relação entre a potência medida e a tensão de saída

do módulo é bem linear. Da teoria estatística (VIEIRA,1999), R^2 é o coeficiente de determinação que é a proporção da variável total explicada por uma regressão linear. R^2 (R quadrado) indica o quão boa foi a calibração e quanto mais próximo de 1 melhor.

Ainda segundo Vieira (1999), r é o coeficiente de correlação e indica o grau de associação linear entre duas variáveis. Em uma regressão linear simples o valor de r é igual a $R^{1/2}$. Com a Equação de calibração encontrada determinou-se $R^2 = 0,986$. O Valor de r foi de 0,9929.

Já a calibração da rotação do rebolo foi feita utilizando-se um tacômetro e um multímetro, ambos digitais. Assim, variando os valores de frequência do inversor obtinha-se uma leitura no tacômetro e simultaneamente no multímetro. Fez-se a leitura para três valores de frequência como se observa na Tabela 3.7, sendo obtidos os respectivos valores de rotação e tensão. A Tabela 3.7 apresenta os valores médios obtidos.

Tabela 3.7 – Valores da frequência, rotação e tensão utilizados para a calibração da curva de rotação do rebolo.

Frequência (Hz)	Rotação (rpm)	Tensão (V)
20	568	2,03
40	1156	4,08
60	1754	6,09

A partir dos dados da Tabela 3.8, obteve-se por regressão linear a Equação 3.2 de calibração da rotação do rebolo.

$$RPM = 2,6313.V^2 + 270,75198.V + 7,5303 \quad (3.2)$$

Onde: RPM: é rotação do rebolo calibrado;

A partir de uma metodologia específica desenvolvida pelo grupo de pesquisa do laboratório de Usinagem por Abrasão, com auxílio de curvas fornecidas pelo fabricante do motor, obteve-se a Equação 3.3, que relaciona a potência elétrica consumida pelo motor e a potência mecânica P_{mec} entregue no eixo do mesmo para acionar o rebolo.

$$P_{mec} = -2,3196.e^{-8}.P_{elet}^3 + 1,6659.e^{-4}.P_{elet}^2 + 5,3593.e^{-1}.P_{elet} - 28,961 \quad (3.3)$$

Onde: e é exponencial de base 10;

Obteve-se a força tangencial de corte foi obtida em tempo real no momento da realização dos ensaios através de um programa desenvolvido no LabView 6.1®, da National Instruments® que está descrito no 3.4.3.

A medição da rotação do rebolo durante os ensaios foi realizada por meio de um encoder industrial blindado analógico, marca Abraf com capacidade de medição de até 3000 rpm, faixa de tensão de 0 à 10V (modelo TH 10 R 3000, fabricado pela Abraf Indústria e Comércio LTDA), o qual foi acoplado ao eixo do motor da retificadora por um acoplamento elástico, conforme apresentado na Figura 3.25. Este encoder é alimentado por uma tensão de 20 a 25 volts através de uma fonte. O valor máximo de tensão gerado pelo encoder foi 10 volts que é a máxima tensão suportável pela placa de aquisição dados para uma rotação máxima de 3000 rpm.

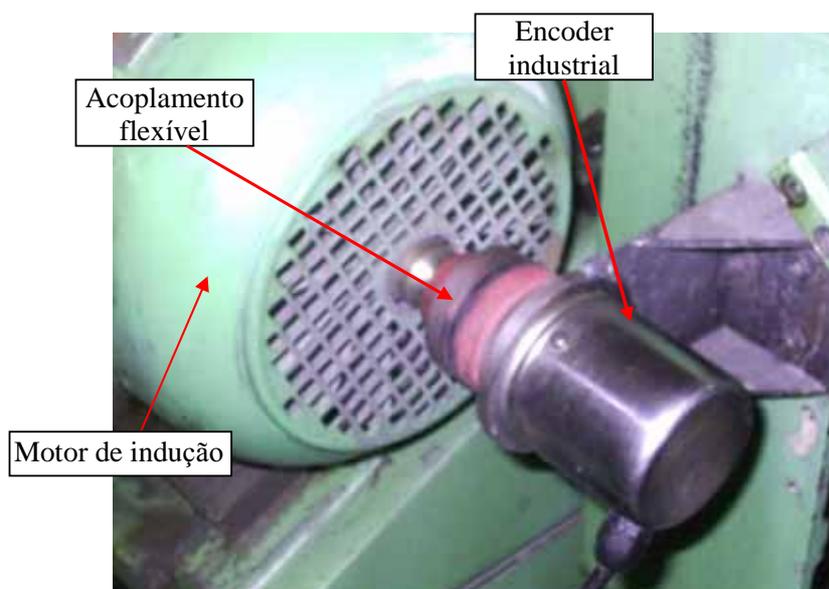


Figura 3.25 – Localização do encoder acoplado no eixo do motor da retificadora

Os valores em tempo real da rotação do rebolo durante todos os ensaios foram armazenados pelo programa de aquisição de dados desenvolvido no LabView 6.1®, da National Instruments® (item 3.4.3).

Após a obtenção da potência mecânica e da rotação do rebolo, calcula-se a força tangencial de corte pela Equação 3.4:

$$F_t = \frac{60P_{mec}}{d_s n \pi} \quad (3.4)$$

Onde: F_t é a força tangencial de corte [N];

d_s é o diâmetro do rebolo [mm];
 n é a rotação do eixo do rebolo [RPM].

Evidencia-se que esta variável de saída foi medida em tempo real, ou seja, no momento que o processo de retificação acontecia. Os resultados das forças tangenciais de corte são apresentados na forma de gráficos, nos quais cada ponto corresponde a uma média aritmética dos valores máximos de solicitação do rebolo, para cada ciclo de retificação, obtidos para os cinco ensaios efetuados sob as mesmas condições de usinagem. Ressalta-se que nos valores referentes a esta variável de saída, que são apresentados no Capítulo 4, já estão subtraídos os valores referentes às forças tangenciais de corte adquiridas em vazio. Na Figura 3.26 é apresentado o gráfico da força tangencial de corte de um dos ensaios deste trabalho. Observa-se que antes de iniciar os ciclos de retificação já ocorrem forças devido à forças resistentes internas. Essa força apresentada sem ter se iniciado os ciclos de retificação é a chamada força em vazio. Essa força foi descontada de todos os ensaios realizados. Durante cada ensaio são gerados aproximadamente 2.760.000 amostras(2000 pontos por segundo).

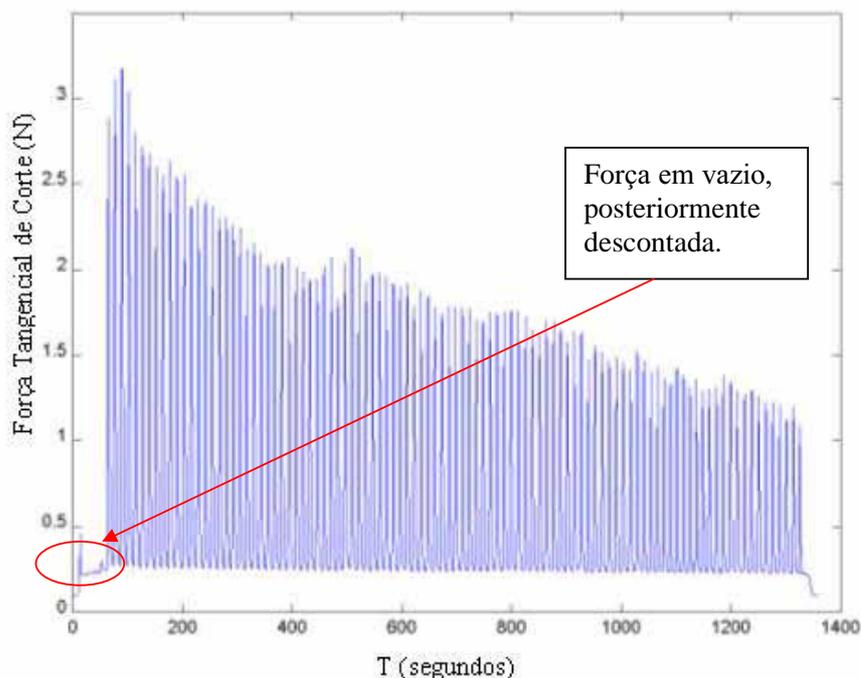


Figura 3.26 – Exemplo do gráfico gerado pelo programa de obtenção da força tangencial de corte.

Os resultados obtidos para a força tangencial de corte referentes às várias condições ensaiadas são apresentadas no Capítulo 4.1 desta Tese.

Para a aquisição da energia específica de retificação houve necessidade do monitoramento da velocidade periférica do rebolo e da força tangencial de corte. Os demais parâmetros envolvidos no cálculo desta variável de saída, como o diâmetro da peça, a velocidade de mergulho e a largura de retificação já são conhecidos.

Os resultados da energia específica de retificação, assim como os valores da força tangencial de corte foram obtidos pela média aritmética de cinco ensaios realizados sob as mesmas condições de usinagem. Nas Figuras referentes a esta variável de saída, cada ponto no gráfico representa a energia específica de retificação no momento de maior solicitação da ferramenta abrasiva para cada um dos 100 ciclos de retificação.

3.4.2. Emissão acústica

O sinal de emissão acústica (EA) foi monitorado em tempo real, pelo seu valor médio quadrático (RMS ou *Root Mean Square*), utilizando um aparelho marca Sensis, modelo BM12. O sensor acústico foi acoplado ao contra-ponta fixa da máquina retificadora e detectava as variações nas emissões acústicas que eram enviadas para o módulo de EA, o qual transformava as mesmas em tensões elétricas. O módulo enviava o sinal destas tensões elétricas até a placa de aquisição instalada no microcomputador de maneira direta sem a necessidade de nenhum tipo de equacionamento.

Através de ensaios preliminares determinou-se a seguinte regulagem no aparelho de medição da EA para que o sinal obtido não saturasse e se obtivesse a melhor resposta do sinal RMS de EA: Ganho de sinal: 3dB; redução de ruído: 30 dB; ganho de entrada: 3 dB; e constante de tempo: 1ms.

Destaca-se que todos estes valores foram mantidos constantes durante todos os ensaios. A Figura 3.27 apresenta a localização do sensor de emissão acústica.

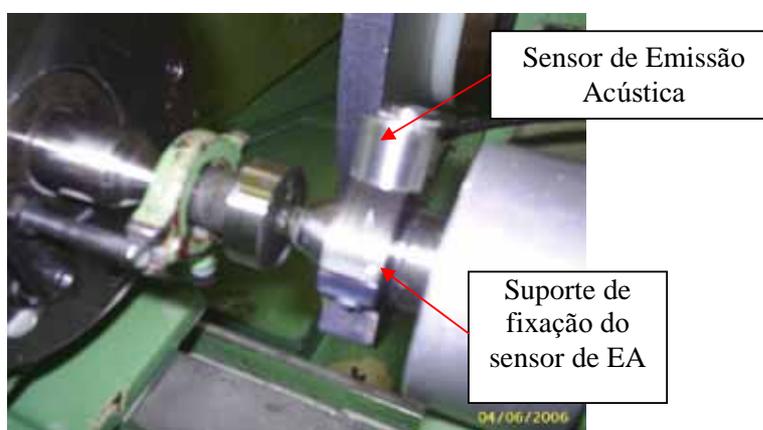


Figura 3.27 – Localização e fixação do sensor de emissão acústica

Os resultados de emissão acústica (RMS) são apresentados no Capítulo 4 na forma de gráficos de barras. Cada barra, com seu respectivo desvio padrão, corresponde à média aritmética dos pontos máximos obtidos para cada um dos 100 ciclos de retificação, nas cinco repetições de cada ensaio efetuado sob as mesmas condições de usinagem.

Os valores obtidos referentes a emissão acústica que são apresentados no Capítulo 4, já estão subtraídos os valores referentes às emissões acústicas em vazio. Na Figura 3.28 é apresentado o gráfico da emissão acústica de um dos ensaios deste trabalho. Observa-se que antes de iniciar os ciclos de retificação já ocorrem emissões devido a inúmeros fatores como rolamentos, motor, etc. Apesar de não significativo, a emissão acústica obtida em vazio foi descontada de todos os ensaios realizados.

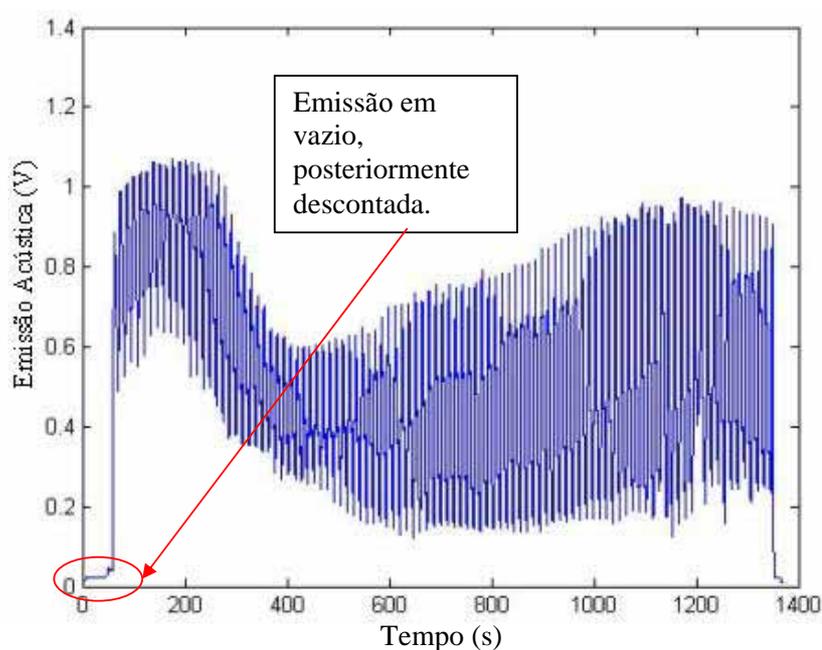


Figura 3.28 – Exemplo do gráfico gerado pelo programa de obtenção da emissão acústica de um dos ensaios realizados (Ensaio 12).

3.4.3. Programa de aquisição de dados

O programa de aquisição de dados desenvolvido para esta pesquisa teve a função de adquirir em tempo real os valores da rotação instantânea do rebolo, a potência elétrica do motor e a emissão acústica (RMS) do sistema. Os valores adquiridos para cada ensaio foram armazenados em arquivos de dados para posterior processamento e confecção dos gráficos dos resultados.

A Figura 3.29 apresenta a tela principal do programa de aquisição de dados desenvolvido no programa LabView 6.1®.

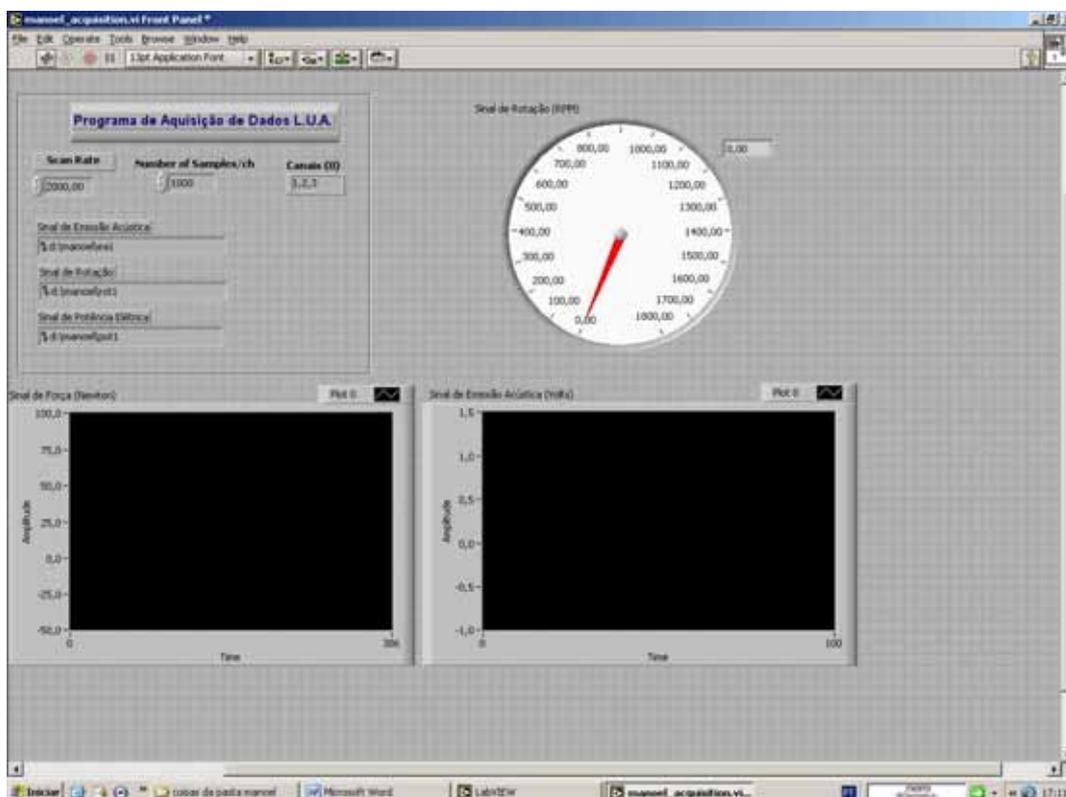


Figura 3.29 – Tela do programa de aquisição de dados para algumas das variáveis de saída obtidas diretamente durante o processo de retificação

Com os dados armazenados no programa acima mencionado realizou-se o cálculo da força tangencial de corte e energia específica de retificação.

3.4.4. Banco de ensaios

Os ensaios foram realizados na forma de ciclos de retificação intercalados de um respectivo tempo de centelhamento, sendo que durante os ensaios a quantidade de material removida foi constante para todas as peças usinadas.

A Figura 3.30 mostra uma visão geral do banco de ensaios montado para a aquisição dos dados da operação de retificação realizada.

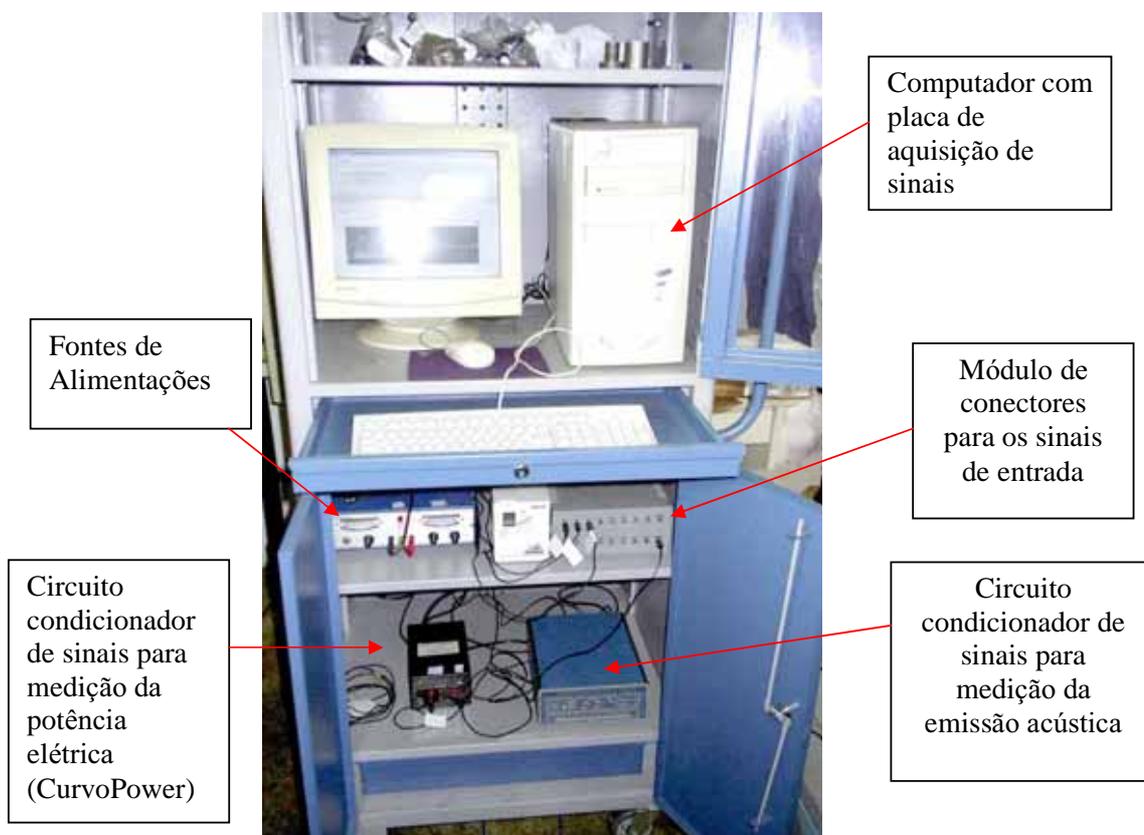


Figura 3.30 – Montagem dos equipamentos para aquisição dos dados

3.5. PREPARAÇÃO DO BANCO DE ENSAIOS

Para a preparação do banco de ensaios foram tomados alguns cuidados de forma que os resultados obtidos pudessem ser confiáveis. A seguir são descritos esses procedimentos

3.5.1. Balanceamento do rebolo de CBN

Com o objetivo de eliminar a influência negativa que a concentração de massa em um rebolo poderia ocasionar nos ensaios realizou-se um procedimento de balanceamento do rebolo da seguinte forma:

- Primeiramente o rebolo foi montado na placa de fixação. A placa de fixação apresenta 5 pesos (massas) que podem ser movidos dentro de um canal trapezoidal em ângulos de até 360°.
- Após a fixação do rebolo na placa, o conjunto rebolo/placa foi montado na retificadora cilíndrica externa onde foi realizado um procedimento de dressagem inicial para a correção do batimento do rebolo. Com esse procedimento o rebolo passou a estar concêntrico com a placa de fixação.

- Terminada a correção do batimento do rebolo, o conjunto rebolo/placa foi montado em um eixo cônico e colocado sobre um suporte de balanceamento devidamente nivelado onde foi realizado o procedimento de balanceamento. Para a realização deste procedimento foram necessárias várias horas de trabalho por ser um processo manual e para poder se atingir um bom resultado. O procedimento consistia em girar o rebolo sobre o suporte e observar a posição angular deste ao parar. O lado do rebolo que ficava apontada para baixo demonstrava que deste lado havia uma maior concentração de massa. Para eliminar a concentração de massa, os pesos existentes na placa de fixação eram movidos na direção oposta ao lado que apresentava concentração de massa. Este procedimento foi realizado inúmeras vezes até que ao girar o rebolo sobre o suporte de balanceamento várias vezes, este não parava mais em uma única posição indicando não haver mais a concentração de massa.

3.5.2. Limpeza do reservatório usado para o método convencional e método otimizado

Antes da realização dos ensaios realizou-se a limpeza do reservatório sendo inclusive desinfetado. Também realizou-se a limpeza da bomba centrífuga e das tubulações. Esse procedimento faz-se necessário para evitar e diminuir o ataque do fluido de corte por bactérias. Convém ressaltar que foi realizado o controle biológico do fluido de corte através de bactericida ADEP 30 do fabricante Shell do Brasil S.A.

3.5.3. Elaboração de suporte para o Sensor de Emissão acústica

Fabricou-se um suporte bipartido cônico (aço ABNT 1045) de maneira a encaixar perfeitamente na contra-ponta cônica. Na Figura 3.31 é apresentado o suporte bipartido fixado à contra-ponta.



Figura 3.31- Suporte bipartido fixado à contra-ponta.

3.6. PROCEDIMENTOS REALIZADOS ANTES DE CADA ENSAIO

Antes de se iniciar os ensaios as seguintes providências eram adotadas:

- De acordo com o número do ensaio a ser efetuado (segundo Tabela 3.5), verificava-se o tipo de lubri-refrigeração a ser usada; o tipo de fluido de corte, de bocal para aplicação de fluido e parâmetros de corte utilizados;
- Posicionava-se o bocal de aplicação de fluido de corte sempre a uma distância vertical de 30 mm da região da interface peça/rebolo;
- Verificavam-se os valores de concentração e pH para o fluido, mantendo-os sempre constantes para evitar que uma possível variação dos mesmos pudesse influenciar os resultados do processo;
- Colocava-se o sistema de lubri-refrigeração em funcionamento por cerca de 30 minutos, antes do início dos ensaios a fim de que o equipamento atingisse seu regime de funcionamento ideal. Enquanto isso se ajustava pelo registro de esfera a vazão correta a ser utilizada durante a retificação de cada corpo de prova;
- Realizava-se a programação dos parâmetros de corte no Comando Numérico Computadorizado (CNC) da retificadora;

Por fim, deixava-se o programa CNC e o de aquisição de dados preparados para serem executados quando necessário.

3.7. PROCEDIMENTOS EFETUADOS DURANTE A RETIFICAÇÃO

Neste item apresenta-se a seqüência de passos utilizados para a confecção de uma peça, considerando-se a retificadora CNC já programada e tanto o banco de aquisição de dados como o programa computacional feito em LabView 6.1®, prontos para adquirirem os dados dos ensaios.

Aplicou-se, portanto a seguinte metodologia de experimentação para a retificação:

- Inicialmente dressava-se o rebolo com a velocidade da mesa constante de 2mm/s, retirando-se por passagem do dressador no rebolo 2 μ m. Este processo foi repetido até que a superfície do rebolo fosse toda desgastada.
- Em seguida fixava-se o corpo de prova na placa de arraste.
- Depois de fixado o corpo de prova à placa de arraste, fixava-se o corpo de prova entre pontas, posicionando o rebolo em frente da região a ser retificada.
- Em seguida ligava-se o programa CNC da máquina e colocava-se em execução o programa de normalização das peças, eliminando-se desta forma imperfeições e distorções que pudessem estar presentes nas mesmas. Neste processo de normalização das peças, retirava-se 0,2 mm do diâmetro de cada peça (2 ciclos de retificação). Desta forma, garantia-se que as condições iniciais de corte fossem padronizadas. Com isto, as peças que foram fornecidas com diâmetros de $37^{+0,01}$ mm diminuía seus diâmetros para de 36,8 mm.
- Terminada a normalização, ligava-se o programa de aquisição de dados e realizava-se na peça 100 ciclos de retificação intercalados de 8 segundos de centelhamento. Para a aquisição de dados alguns cuidados eram tomados para se obter os valores requeridos. Esses cuidados foram:
 - primeiramente, com o rebolo parado, colocava-se em execução o programa de aquisição de dados. Dessa forma o programa fazia uma aquisição de força tangencial de corte igual a zero, rotação do rebolo igual a zero e emissão acústica sem influência do motor;
 - Após alguns segundos depois de começada a aquisição de dados, o rebolo era ligado e entrava em regime após alguns segundos na rotação desejada produzindo uma velocidade de corte de 30m/s. Neste momento os dados obtidos pelo programa de aquisição são dados referentes à situação em vazio. Ou seja, todos os elementos estão ligados, mas não há o contato do rebolo com a peça. Para a

obtenção dos resultados finais foram descontados os valores obtidos em vazio (Capítulo 4).

- Finalmente, após obtidos os dados em vazio foi executado o programa de usinagem gravado no módulo CNC da retificadora. A partir desse ponto foi realizado 100 ciclos de retificação.

Cada ciclo de retificação removía 0,1 mm do diâmetro da peça, com uma velocidade de mergulho de 1,0mm/min, desgastando 10 mm do diâmetro externo da peça.

- Depois de encerrada a operação de retificação da peça, verificava-se como o ensaio havia transcorrido através do uso de um programa feito em Matlab®. Com este programa foi possível verificar se todos os dados necessários haviam sido armazenados e se não havia ocorrido nenhuma falha na aquisição. Desta maneira foi possível observar o comportamento das variáveis: força tangencial de corte, emissão acústica e velocidade de corte (rotação do rebolo). Caso algo muito diferente e estranho ocorresse o ensaio era descartado. Nesta análise inicial foi consumido um tempo de aproximadamente 10 minutos para que o programa apresentasse o gráfico. Este tempo deve-se ao fato de que durante os 100 ciclos de retificação são gerados aproximadamente 2.760.000 pontos para cada variável (2000 pontos de aquisição por segundo). A Figura 3.32 apresenta um gráfico gerado pelo programa de acompanhamento de ensaio onde não ocorreram falhas indicando que o ensaio foi válido.

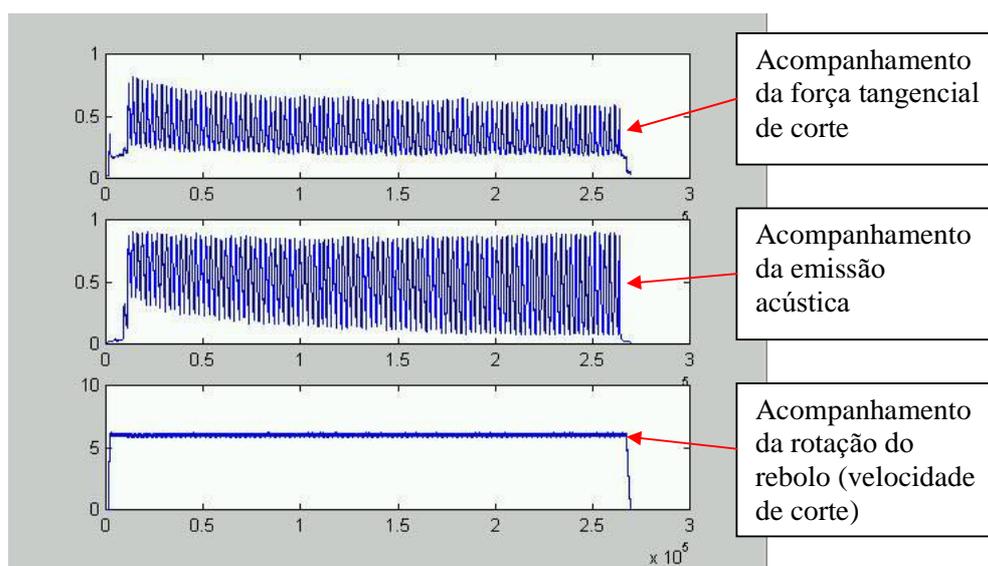


Figura 3.32– Tela do programa de acompanhamento do ensaio.

- Terminado os 100 ciclos de retificação e a verificação do acompanhamento do ensaio realizava-se a marcação do perfil do rebolo em um tarugo de aço ABNT 1045 com 40mm de largura. Inicialmente o tarugo foi fixado à uma placa de arraste. Em seguida o corpo de prova foi fixado entre pontas na retificadora. Para a impressão do desgaste do rebolo usava-se o mesmo programa de normalização retirando 0,1 mm do diâmetro do tarugo.
- Depois de marcado o perfil do rebolo no tarugo, retirava-se o mesmo da máquina e iniciava-se a realização de novos ensaios seguindo o roteiro citado, lembrando-se de se fazer as devidas mudanças conforme necessário para a realização de cada ensaio.
- Ao final da retificação dos 45 corpos de prova iniciais (MQL, MO e MC), realizou-se 3 (três) ensaios com queima aparente, sem uso de qualquer lubrificação. O objetivo destes ensaios foi fazer uma comparação com os demais ensaios podendo apresentar os danos envolvidos e se estes danos aparecem quando da utilização das três formas utilizadas de lubri-refrigeração.
- Ao final da retificação de todos os 50 corpos de prova, passou-se para a medição das demais variáveis que não foram obtidas em tempo real (rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo, microdureza, tensão residual e análise de microestruturas).

A seguir são apresentadas as formas como foram efetuadas as medições das demais variáveis de saída.

3.8 MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA NÃO OBTIDAS EM TEMPO REAL

3.8.1 Medição da rugosidade

Para a medição da rugosidade média das peças, representado pelo parâmetro R_a , utilizou-se um aparelho da marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+. A medição foi realizada na direção perpendicular à superfície de retificação.

O comprimento de medição (cut-off) utilizado foi de 0,8 mm e o filtro foi o 2CR-fase corrigida. O raio da ponta do diamante do medidor de rugosidade foi de 0,2 μm .

Para tais medições, as peças foram colocadas em um mandril e presas sobre um prisma, e só então se executava a medição com o auxílio do programa de medição, segundo apresentado na disposição dos equipamentos da Figura 3.33.



Figura 3.33 – Exemplo da disposição dos equipamentos para a medição da rugosidade (R_a)

A rugosidade de cada peça foi medida após a execução de 100 ciclos de retificação. Para cada uma destas realizou-se cinco medições em regiões diferentes e equidistantes.

3.8.2 Desgaste diametral do rebolo

A medição desta variável de saída do processo foi realizada ao final de cada ensaios pela marcação do perfil do rebolo, em um tarugo (corpo de prova) de aço ABNT 1045. Desta forma, devido ao fato do rebolo possuir uma região desgastada, que foi a região onde se processou a retificação das peças, formava-se um degrau no perfil do rebolo marcado no tarugo. Este degrau, que é, portanto, o desnível entre a região gasta e a não gasta do rebolo, foi necessário para se medir o desgaste diametral do rebolo.

Depois de realizar a marcação do perfil do rebolo, efetuou-se a medição do desgaste do rebolo com um relógio comparador TESA digital, modelo TT10, com precisão de $0,1 \mu\text{m}$. A Figura 3.34 mostra o relógio comparador digital TESA durante a medição do desgaste do rebolo impresso no tarugo de aço ABNT 1045. Para a medição desta variável, o tarugo foi disposto sobre um prisma e colocado na mesa de um projetor de perfil que se deslocava micrometricamente a fim de facilitar a medição do desnível formado entre a região desgastada e a não utilizada do tarugo.

Os desgastes diametraes dos rebolos foram medidos após a execução de 100 ciclos de retificação, pelo cálculo da média aritmética de cinco ensaios realizados sob as mesmas condições de usinagem. O desgaste do rebolo, impresso no tarugo, foi medido em cinco regiões distintas.

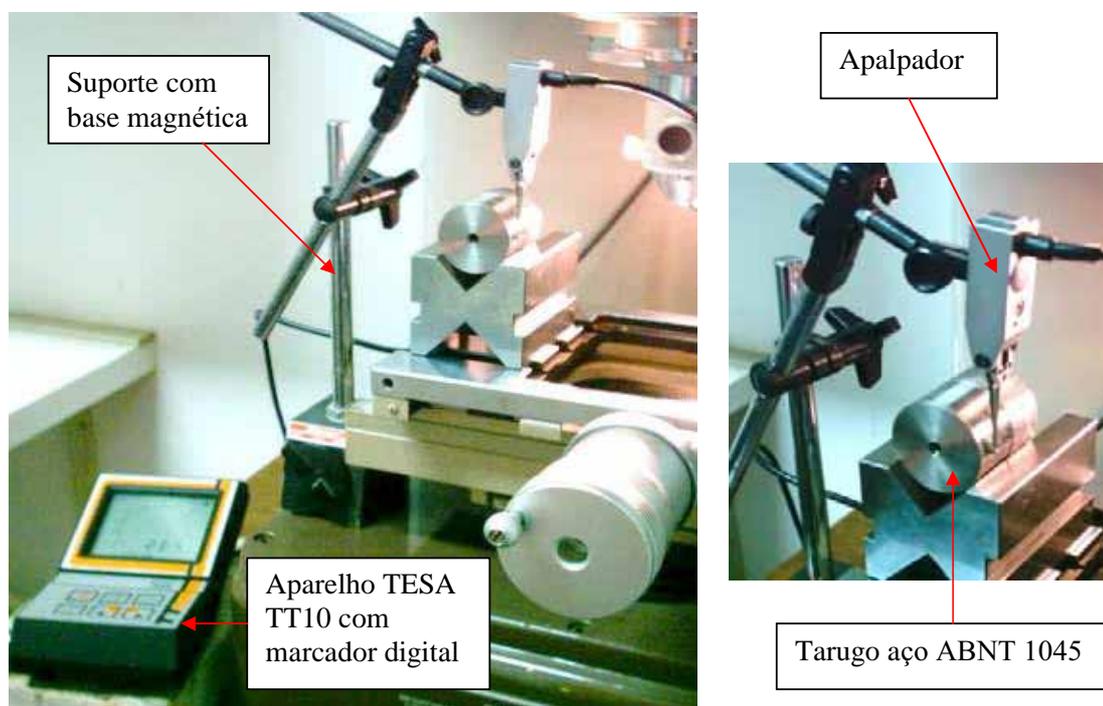


Figura 3.34– Aparelho TESA TT10 durante a medição indireta do desgaste do tarugo

3.8.3 Medição dos desvios de circularidade

Os desvios de circularidade foram medidos no Laboratório de Usinagem por Abrasão da UNESP, *campus* de Bauru com um equipamento medidor de circularidade TALLYROND 31C, da Taylor Hobson através do software TR31 instalado em um microcomputador acoplado ao medidor de circularidade (circularímetro).

Ressalta-se que antes da medição, cada peça foi cuidadosamente limpa com querosene, álcool e tetra cloreto de carbono, a fim de evitar que pequenas partículas influenciassem na medição desta variável de saída.

A Figura 3.35 ilustra o momento em que uma peça estava sendo medida no medidor de circularidade.

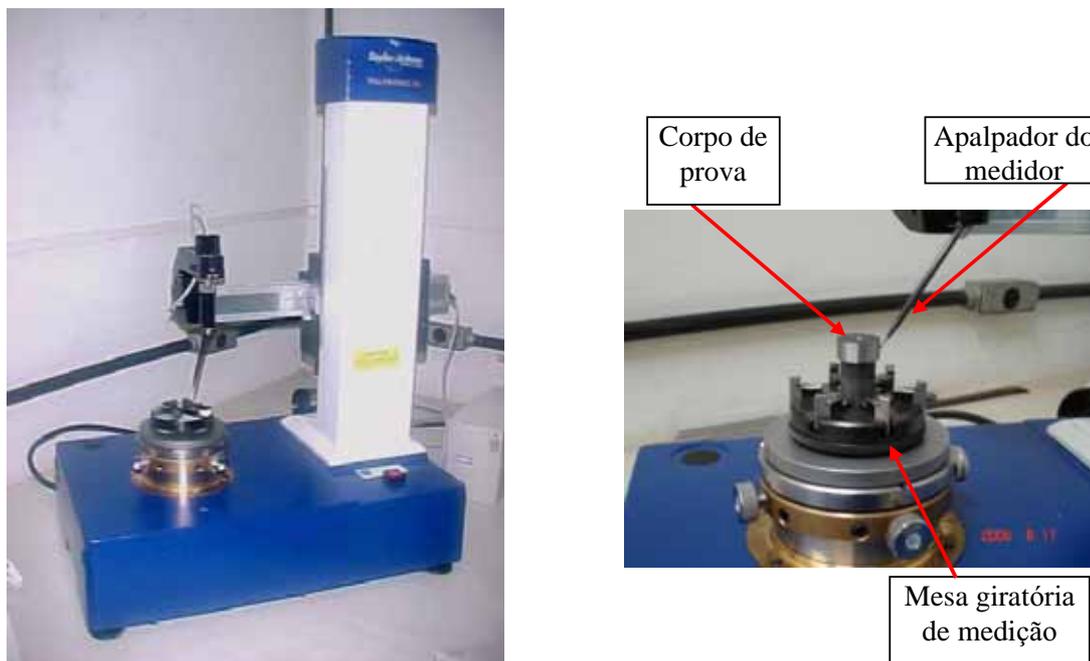


Figura 3.35 – Medidor de circularidade.

Os resultados referentes aos desvios de circularidade medidos após a realização dos 100 ciclos de retificação, são apresentados no Capítulo 4. Os mesmos são representados por meio de gráficos com os respectivos desvios padrões. Cada valor corresponde à média aritmética de cinco repetições, ou seja, cinco ensaios realizados sob as mesmas condições de usinagem. Salienta-se que foram efetuadas para cada corpo de prova três medições, em regiões distintas e distantes em aproximadamente 2 mm. A fixação da peça no medidor de circularidade foi mantida constante.

3.8.4 Preparação das amostras para análise de Tensão residual, MEV e microdureza

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. Dividiu-se o corpo de prova em quatro partes como mostra a Figura 3.36, através do uso de uma máquina de corte por disco abrasivo. O processo de corte destas peças foi efetuado vagarosamente, para que não ocorresse queimas, devido às altas temperaturas provindas do corte com disco abrasivo. Ainda para se evitar esta queima, uma lubri-refrigeração abundante foi utilizada durante o corte das amostras.

Os corpos de prova foram cortados no Laboratório de Materiais da UNESP de Bauru,

com uma máquina policorte, utilizando discos de corte abrasivos para metalografia com dimensões de 230 mm x 1,5 mm x 22 mm.

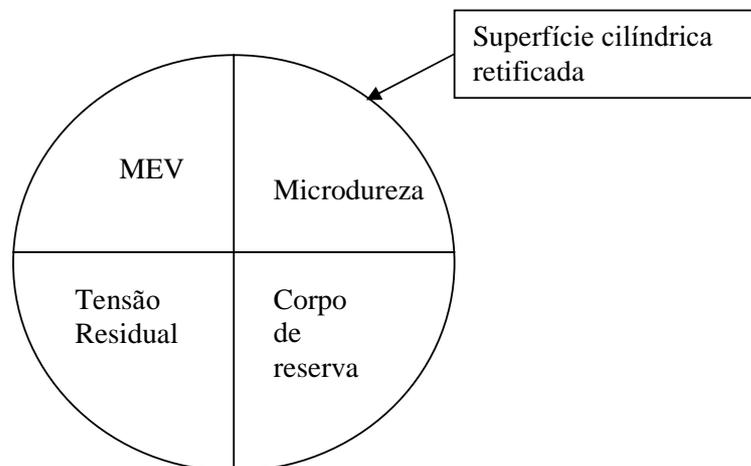


Figura 3.36 - Divisão da peça para análise.

3.8.4.1 Tensão residual

O primeiro passo para se efetuar a análise da tensão residual foi confeccionar as amostras a serem medidas no difratômetro de raios X.

Após terem sido cortadas, as amostras para tensão residual foram embutidas em resina. A disposição do corpo de prova na resina para a análise da tensão residual é apresentada na Figura 3.37.

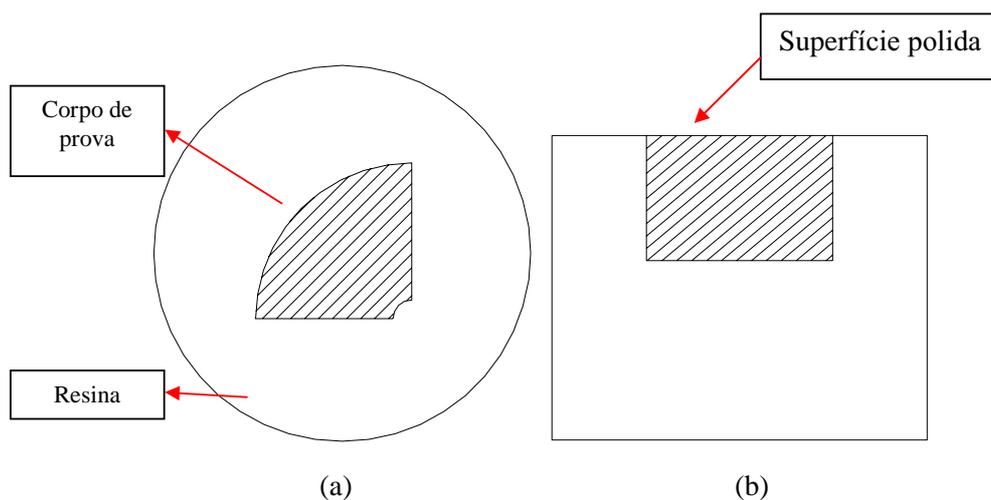


Figura 3.37 - Embutimento do corpo de prova para tensão residual, (a) vista superior, (b) vista lateral

Após a completa solidificação da resina polimérica, a amostra foi lixada e posteriormente polida. Utilizou-se as seguintes granulometrias de lixa: 120, 220, 320, 400, 600, 120 e 1500, e 3 polimentos com alumina de 1, 0,3, e 0,05 μm .

A Figura 3.38 apresenta um dos corpos de prova utilizado para a análise da tensão residual.

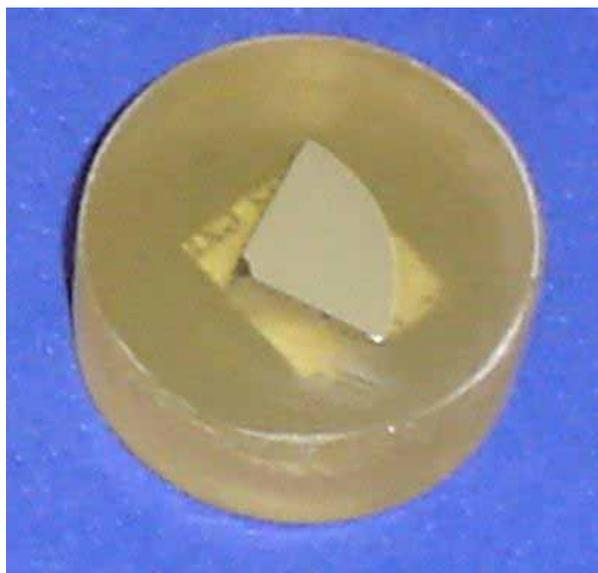


Figura 3.38 – Amostra utilizada para análise da tensão residual

A análise da tensão residual, que reflete o estado de tensão em que se encontra a peça analisada a 15 μm abaixo da sua superfície, foi realizada em parte (convencional e MQL) no CCDM (Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais) UFSCar, em São Carlos. A análise dos ensaios na condição Otimizada foram realizados no IPEM – Instituto de Pesquisas Espaciais e Nucleares em São José dos Campos, pelo método de múltipla exposição ($\text{sen}^2\psi$), por meio da difração de raios-X.

Os equipamentos utilizados foram um Difratorômetro modelo D5000 da marca Siemens, com tubos de raios X com alvo de cobalto (Figura 3.39) e um Difratorômetro Rigaku, Modelo DMAX-2000 com tubos de raios X com alvo de Cromo.

Ressalta-se que a fim de verificar a geração de tensões dentro do processo de confecção das peças a serem retificadas, mediu-se também uma peça apenas torneada e outra após a realização do processo de têmpera e revenimento.

Os resultados referentes a esta variável de saída são apresentados no Capítulo 4 desta Tese.

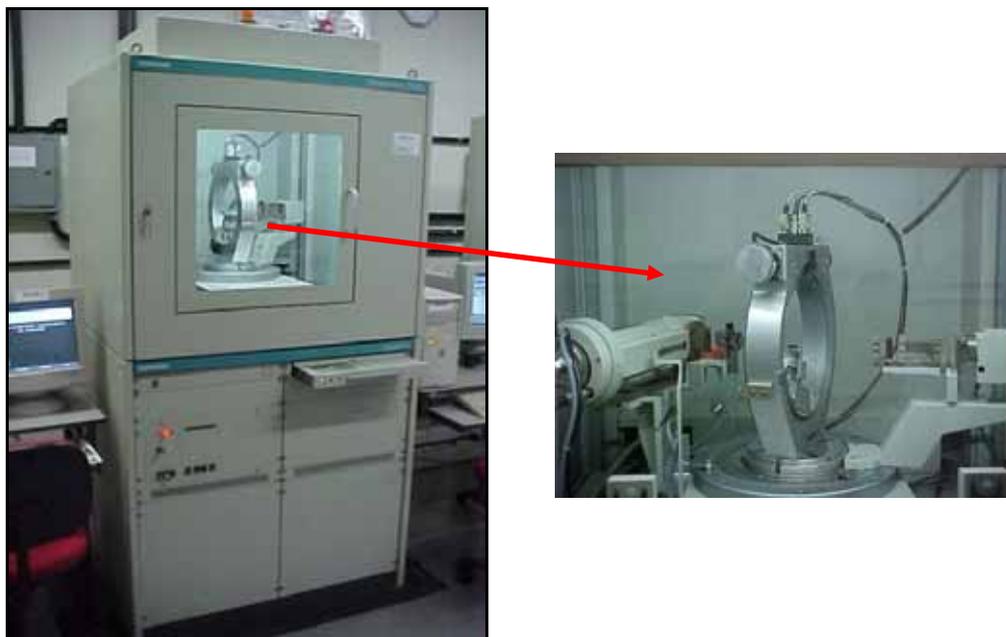


Figura 3.39 – Difratorômetro modelo D5000 da marca Siemens do CCDM (Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais) UFSCar.

3.8.5 Análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura

Com a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foi possível visualizar as microestruturas apresentadas na região localizada abaixo da superfície retificada de cada corpo de prova.

O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento altamente versátil, podendo realizar análises de diversos tipos, sendo empregado para o estudo de elementos microestruturais, como precipitados, fases, defeitos etc.

Ressalta-se que a peça foi preparada para que a MEV fosse realizada nas camadas de material localizadas abaixo da superfície retificada no diâmetro externo das mesmas.

O embutimento das peças em resina foi necessário, pois um dos pré-requisitos para a realização da MEV abaixo da superfície retificada era de que as peças fossem lixadas, polidas e atacadas quimicamente. Realizando o lixamento da peça em uma resina diminui-se a chances de criar um abaulamento nas bordas da peça. Desta forma, lixou-se as amostras empregando-se lixas d'água com as seguintes granulometrias: 120, 220, 320, 400, 600, 1200 e 1500. Depois de lixadas as peças foram polidas numa máquina politriz utilizando-se alumina para polimento metalográfico com elevado grau de pureza (99,99%), com os seguintes tamanhos de partículas: 1 μm , 0,3 μm e 0,05 μm .

Terminado o lixamento, as peças foram retiradas da resina e foram fixadas a um suporte metálico em alumínio. Suporte este com dimensões apropriadas para a colocação no Microscópio eletrônico. A disposição do corpo de prova para MEV é apresentada na Figura 3.40.

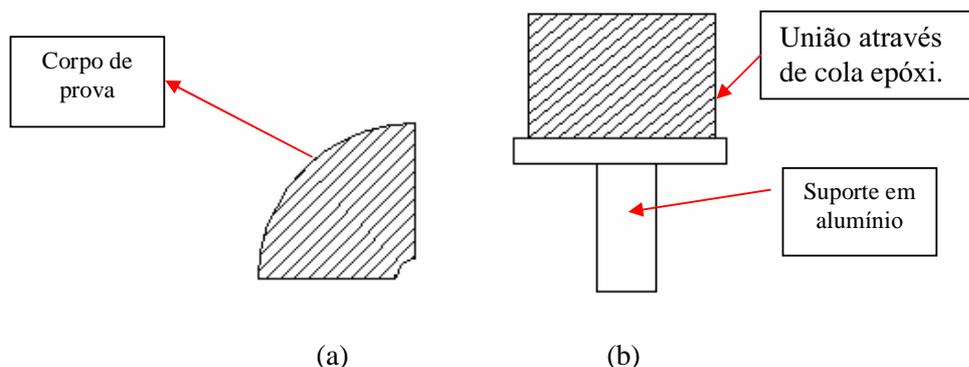


Figura 3.40 – Preparação corpo de prova para MEV, (a) vista superior, (b) vista lateral.

Os corpos de prova preparados para a análise por microscopia eletrônica de varredura são apresentados na Figura 3.41.

Por fim, fez-se o ataque químico nas amostras, com Nital na concentração 1% (1ml de ácido nítrico e 99 ml de álcool etílico), durante 30 segundos. Somente depois as peças foram encaminhadas para a medição desta variável de saída.

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada no Centro de Pesquisa em Óptica e Fotônica, do Instituto de Física de São Carlos (IFSC), da Universidade de São Paulo – USP, *campus* de São Carlos. Foram realizadas ampliações de 2.000 em cada amostra.

O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi um microscópio da marca ZEISS, modelo DSM 960, utilizando-se a técnica dos elétrons espalhados, que permite a visualização com maior facilidade do relevo das estruturas na superfície analisada. A Figura 3.42 apresenta o microscópio utilizado nos ensaios.

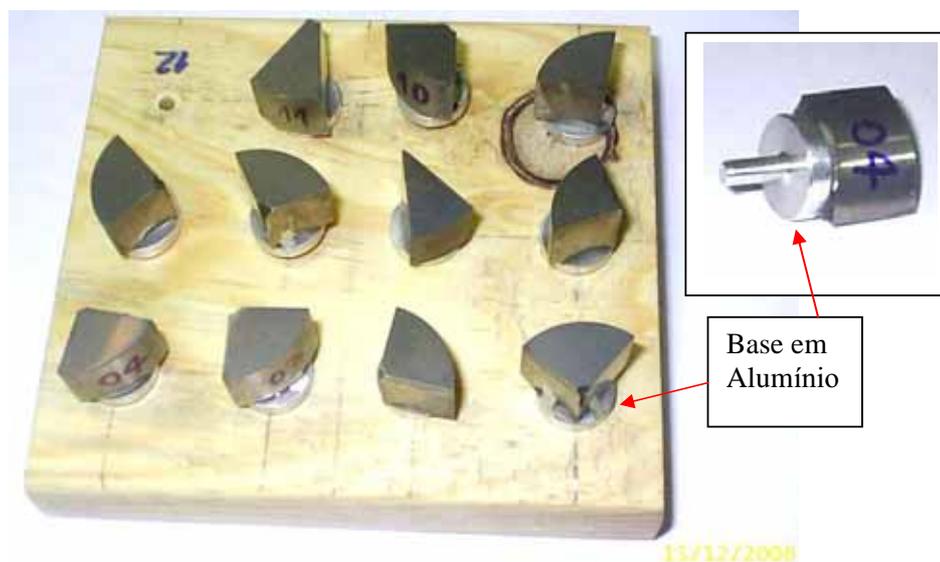


Figura 3.41 – Amostra utilizada para análise de MEV

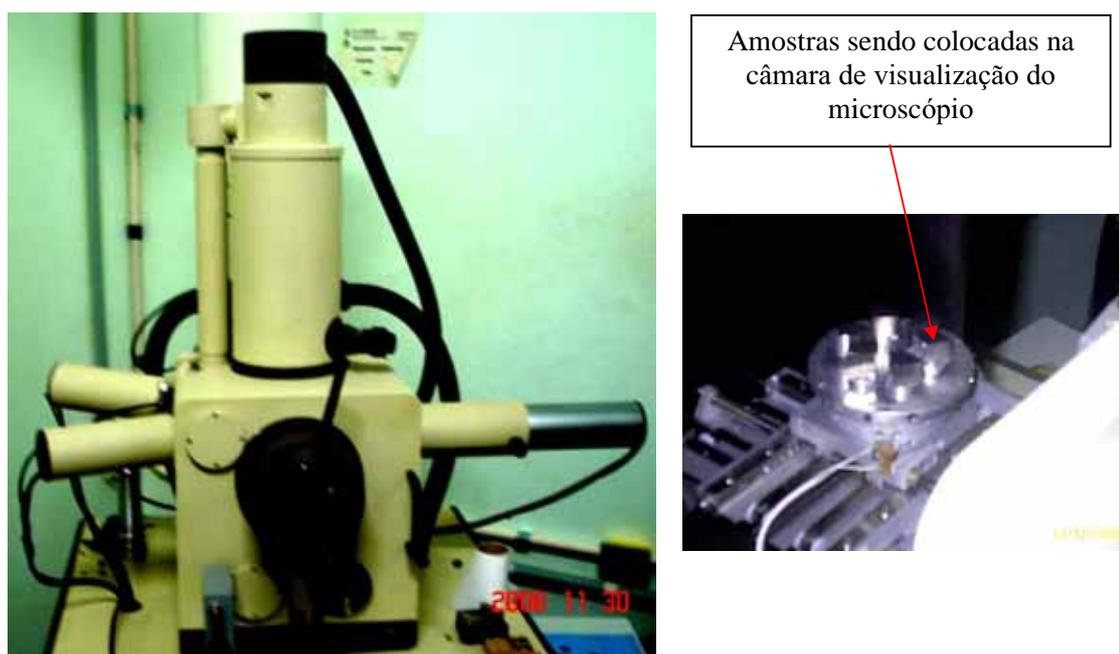


Figura 3.42 – Microscópio eletrônico de varredura DSM 960 do Instituto de Física de São Carlos, USP – São Carlos.

A análise da microscopia eletrônica de varredura foi efetuada em 11 peças (do total de 50 ensaios realizados), sendo uma análise para cada condição ensaiada. Os resultados são apresentados no Capítulo 4.

3.8.6. Microdureza

Para a realização da microdureza os corpos de prova foram embutidos de forma que o corpo de prova obtivesse uma posição conforme Figura 3.43. A superfície tangencial à superfície retificada foi lixada para a análise de microdureza.

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

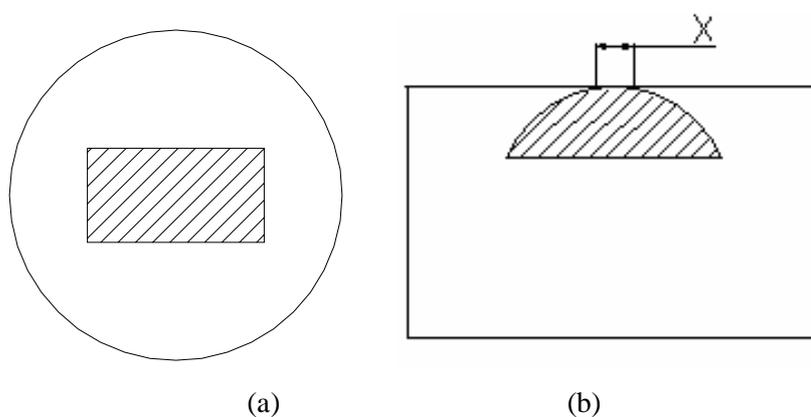


Figura 3.43 - Embutimento do corpo de prova para a análise de microdureza, (a) vista superior, (b) vista lateral.

3.8.6.1. Ensaios de Microdureza realizados

Há dois tipos de microdureza, segundo o tipo de indentador (penetrador) utilizado: Vickers e Knoop. Nesta pesquisa fez-se o levantamento das duas microdurezas. Para a obtenção da microdureza foi utilizado o microdurômetro da marca BUEHLER, modelo 1600-6300 da Escola de Engenharia de São Carlos- USP.

Realizaram-se aplicações de cargas de 100, 200 e 300g a fim de se definir a carga a ser aplicada nos ensaios de microdureza. A carga de 200g 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 40s obtendo-se a microdureza.

Pode-se verificar conforme Figura 3.44 o corpo de prova preparado para as análises de microdureza realizadas.



Figura 3.44 – Amostra utilizada para análise de microdureza

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo são apresentados os resultados e as discussões referentes às variáveis de saída analisadas nesta pesquisa. A análise foi realizada por meio de gráficos de barras acompanhados de seus respectivos desvios-padrões, os quais são apresentados com os valores médios reais das cinco repetições executadas. Também são apresentadas análises usando gráfico de linhas onde são mostrados os valores máximos médios para os 100 ciclos de retificação usados nos ensaios. Para a análise microestrutural utilizaram-se imagens do plano perpendicular à superfície retificada obtidas através de microscópio eletrônico de varredura. Para a tensão residual mediu-se apenas uma peça para cada condição ensaiada, impossibilitando o cálculo do desvio padrão, devido ao alto custo deste ensaio.

As condições utilizadas nos ensaios estão listadas na Tabela 3.5 (Capítulo 3).

4.1. FORÇA TANGENCIAL DE CORTE

Neste item são apresentados os resultados das forças tangenciais de corte (N) em função do número de ciclos de retificação e sistemas de aplicação do fluido de corte.

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os valores de força tangencial de corte com relação à lubri-refrigeração otimizada, convencional e a técnica da MQL utilizando-se um rebolo de nitreto de Boro cúbico (CBN), onde cada ponto corresponde a uma média aritmética dos valores máximos da força tangencial de corte das cinco repetições de cada situação utilizada.

4.1.1. Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada nas forças tangenciais de corte

A Figura 4.1 apresenta a média das forças tangenciais de corte máximas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de lubri-refrigeração otimizada utilizada (Velocidade do jato de fluido de corte igual a 30m/s, 27m/s, 25m/s, 20m/s e 15m/s) durante todo o processo de retificação constituído por 100 ciclos de usinagem.

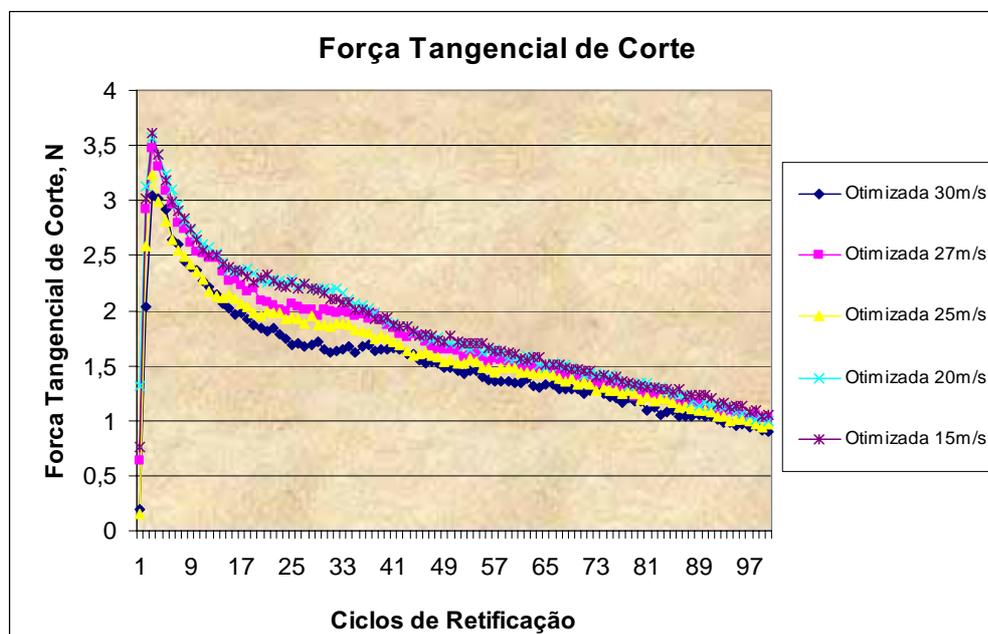


Figura 4.1– Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada nas forças tangenciais de corte máximas

Em relação as diferentes velocidades de aplicação do fluido de corte utilizadas no método otimizado, verifica-se que existe uma certa tendência das maiores velocidades de saída do fluido proporcionarem menores forças tangenciais de corte. Esta tendência pode ser explicada, pois quanto maior a velocidade de aplicação do fluido de corte, mais se aproximava da relação unitária proposta por Webster (1995, 1999), que nesta pesquisa foi a aplicação do fluido com velocidade de saída de 30m/s. Segundo Webster (1995) ao se atingir esta relação o fluido de corte vence a barreira de ar que fica em torno do rebolo e atinge com maior eficiência a interface peça-rebolo, realizando uma melhor lubrificação e refrigeração da peça, e conseqüentemente reduzindo as forças tangenciais de corte.

Os valores de força tangencial de corte diminuem no decorrer dos ensaios devido, possivelmente, pela redução do diâmetro da peça, ocasionando menor arco de contato entre a ferramenta e a peça. Ainda ocorre uma redução da velocidade tangencial periférica do corpo de prova (pois o diâmetro é diminuído a cada ciclo de retificação) provocando um maior tempo de contato do grão abrasivo com a peça, produzindo possivelmente maiores temperaturas, que por sua vez diminuem a resistência do material, exigindo menor força para o corte.

Segundo Silva et al. (2000), outro fenômeno que pode ser analisado e que justifica a redução da força tangencial de corte no decorrer dos ciclos de retificação é o fato do aumento

da quantidade de lubrificante na superfície de ação do rebolo tornando a lubrificação mais favorável na interface rebolo e peça.

Para o caso da lubri-refrigeração otimizada, a perda de afiação não deve ter influenciado no comportamento da força tangencial de corte, pois o desgaste do rebolo nestas condições foi baixo (item 4.5).

4.1.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL e MC nas forças tangenciais de corte.

A Figura 4.2 apresenta a média das forças tangenciais de corte máximas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL (vazão de fluido de corte igual a 80ml/h, 60ml/h, 40ml/h) e para a condição convencional (20l/min) durante todo o processo de retificação constituído por 100 ciclos de usinagem.

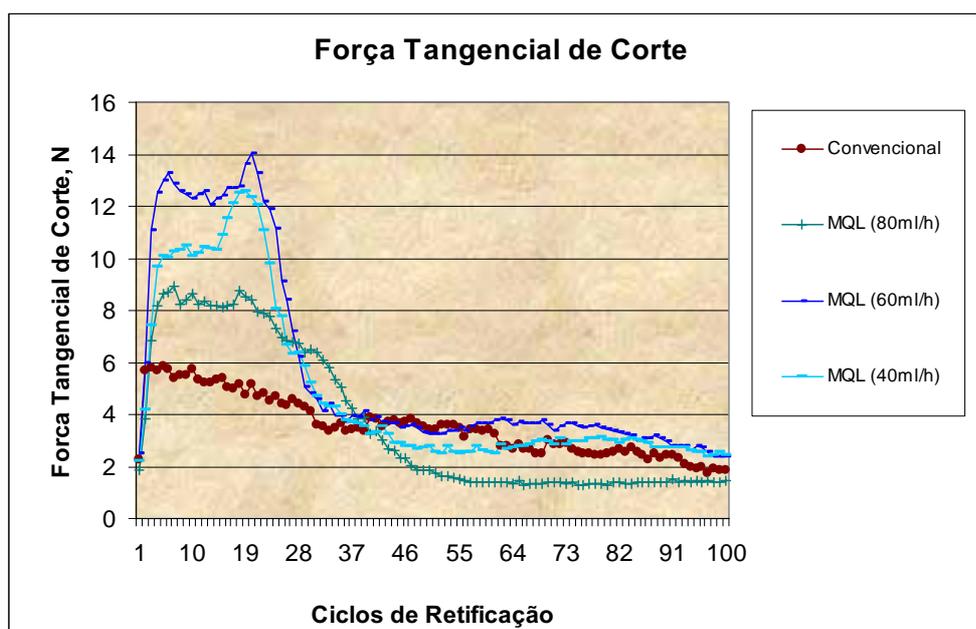


Figura 4.2– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL e MC nas forças tangenciais de corte.

Em relação as diferentes vazões de fluido de corte no sistema MQL verifica-se que existe uma certa tendência das maiores vazões de fluido de corte proporcionarem menores forças tangenciais de corte. Este comportamento ocorre devido ao maior poder lubrificante quando aplicado com maiores vazões diminuindo o efeito do atrito gerado.

Pode-se observar que quando se aproxima do vigésimo ciclo de retificação a força de corte apresenta um aumento devido principalmente ao empastamento do rebolo. Os parâmetros de corte utilizados (a , V_c) produziram inicialmente uma taxa de remoção que a vazão de ar comprimido não foi capaz de remover totalmente. Com o passar dos ciclos de retificação a taxa de remoção era diminuída (menor diâmetro) fazendo com que o sistema MQL fosse capaz de remover os cavacos já impregnados e não deixando com que os novos cavacos formados se depositassem no rebolo.

Também é notado a partir do 50º ciclo de retificação um leve aumento das forças tangenciais de corte para as três condições MQL utilizadas. Fato este explicado pela perda de afiação dos grãos abrasivos. A perda da afiação deve-se principalmente ao desgaste acentuado dos grãos devido à menor lubrificação gerada pelo MQL. Os grãos passam a se tornar planos fazendo com que aumente a tensão sobre eles. No entanto a força volta a decair devido principalmente a friabilidade dos grãos abrasivos o que faz com que o rebolo volte a apresentar capacidade de corte. Quanto a tensão sobre os grãos abrasivos chega a um valor crítico, o grão é fraturado recuperando parte de sua afiação (Bianchi et al, 2000).

Em comparação ao sistema convencional as forças iniciais são maiores devido à menor lubrificidade proporcionada pela técnica MQL aumentando os esforços gastos com o atrito. Com o decorrer do ensaio, a espessura equivalente de corte é diminuída de forma que os esforços sofridos pelos grãos abrasivos sejam diminuídos. Cada grão abrasivo passa a ficar menos tempo em contato com a peça.

Com o desgaste da peça, esta passa a apresentar uma menor velocidade tangencial, fazendo com que a velocidade relativa entre peça e rebolo aumente. O aumento desta velocidade relativa proporciona o aumento do número de grãos ativos num mesmo intervalo de tempo provocando o decréscimo na força de corte, devido à menor participação de cada grão na operação.

Observa-se que as forças obtidas com a condição de vazão de 40ml/h ficaram menores que a condição com vazão de 60ml/h. Fato este que pode ser justificado por uma possível alteração na posição de ajuste do bocal. Visto isso, nota-se a importância de se investigar, em trabalhos futuros, vazões intermediárias às utilizadas nesta pesquisa verificando se existe uma vazão ideal de ser empregada no sistema MQL. Nota-se que um sistema MQL deve ser empregado em condições precisas de ajuste e instalação para evitar o fracasso do processo.

4.1.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte nas forças tangenciais de corte.

A Figura 4.3 apresenta a média das forças tangenciais de corte máximas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas permitindo avaliar e comparar os métodos entre si.

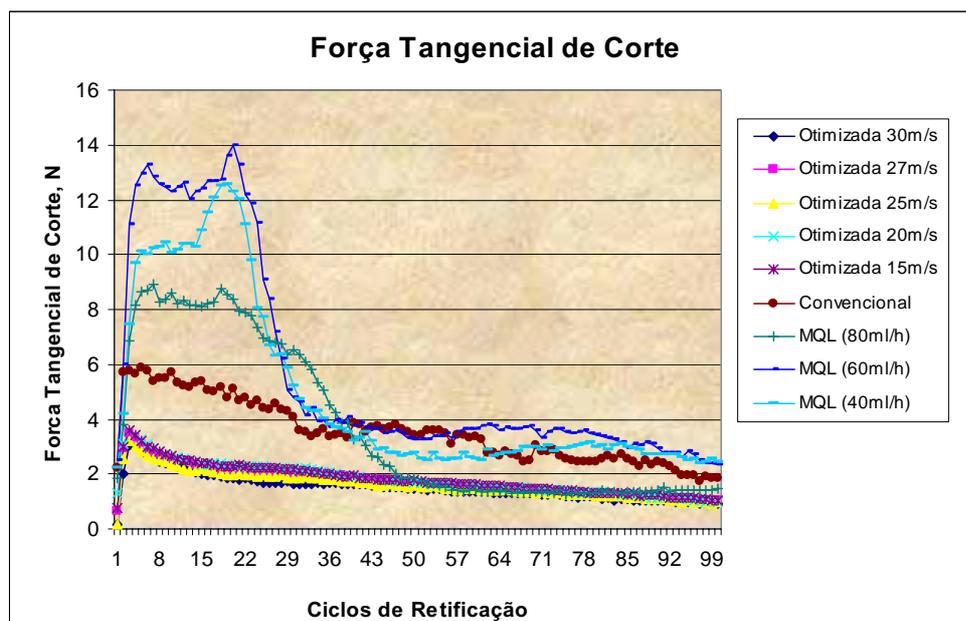


Figura 4.3– Análise das formas de aplicação de fluido de corte nas forças tangenciais de corte.

A análise da Figura 4.3 permite observar que as forças de corte envolvidas nos processos de MQL foram bem superiores que para o sistema convencional e sistema otimizado.

O sistema otimizado mostrou-se capaz de lubrificar de forma muito eficiente, fazendo que com isso o desgaste do rebolo seja diminuído aumentando sua vida. As altas velocidades envolvidas nos processos otimizados favoreceram uma melhor entrada de lubrificante na zona de contato peça e rebolo diminuindo a parcela de esforço gasto entre atrito da peça com a ferramenta.

O sistema convencional apresentou-se como um sistema intermediário entre sistemas otimizados e MQL com relação às forças de corte. Tanto no sistema otimizado quanto no convencional a perda aparente da afiação foi muito sutil durante os 100 ciclos de usinagem (próximo ao 25º ciclo para lubri-refrigeração otimizada). Com este raciocínio, pode-se

observar uma menor necessidade de dressagens quando aplicando essas técnicas quando comparadas com MQL.

A seguir, nas Figuras 4.4 e 4.5, são apresentados dois gráficos típicos de força tangencial de corte para cada condição otimizada e condição MQL. Estes gráficos foram gerados pelo programa de aquisição de dados utilizado nesta pesquisa e apresenta todos os pontos obtidos durante todo o ensaio realizado (Força tangencial x tempo). Foram escolhidos dois desses gráficos representativos do sistema otimizado e sistema MQL de forma que se possam observar as diferenças ocorridas durante todos os 100 ciclos de retificação onde foram gerados 2.760.000 pontos aproximadamente.

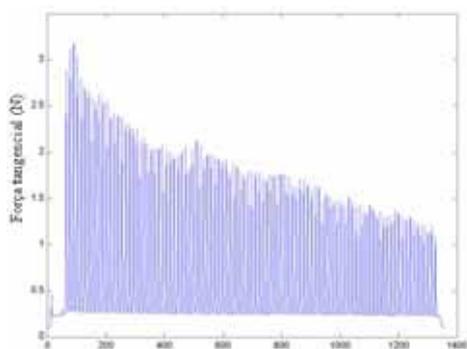


Figura 4.4– Condição otimizada 30m/s (ensaio 25)

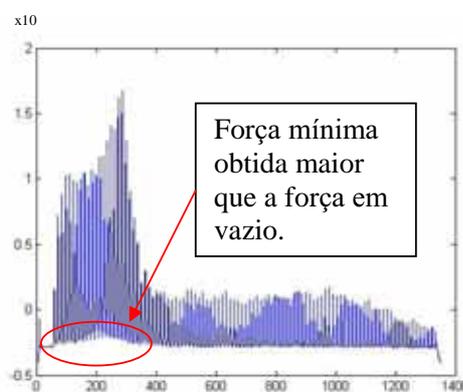


Figura 4.5– Condição MQL 40ml/h (Ensaio 17)

Com as Figuras 4.4 e 4.5, onde são apresentados todos os valores de força tangencial gerados, observa-se que as forças mínimas de corte para sistemas otimizados retrocedem ao valor mínimo durante o tempo de centelhamento, mostrando que o tempo de centelhamento de 8 segundos usado foi capaz de remover todo o material durante o avanço do rebolo de 0,1mm no diâmetro do corpo de prova. Além disso, as deformações geradas na peça durante o avanço foi capaz de se recuperar durante o centelhamento. Fato observado para todas as condições otimizadas e condição convencional.

No caso dos sistemas MQL utilizados, a Figura 4.5 permite concluir que como as forças mínimas, até o vigésimo ciclo aproximadamente, ficaram acima da força obtida em vazão. O tempo de centelhamento de 8 segundos não foi suficiente para que todo o material contido na profundidade de avanço fosse removido e/ou as deformações geradas não foram totalmente recuperadas. Isso se deve ao menor poder de corte obtido nesta parte do ensaio mostrando que possivelmente o rebolo não estava cortando, seja por perda da afiação ou por empastamento.

Para todas as condições ensaiadas percebe-se que nos primeiros ciclos de todas as condições, ocorrem maiores valores para a força de corte, que ao longo dos ciclos vão sendo diminuídas devido à renovação das arestas de corte e à capacidade de auto-afiação do rebolo de CBN. Deve-se notar ainda durante os ensaios ocorre a diminuição do diâmetro da peça, resultando em um menor arco de contato (l_c), e uma redução da velocidade periférica da peça (V_w), proporcionando 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 (WEINGAERTNER et al., 2001). Essa afirmação torna-se importante no caso do sistema MQL já que após realizado qualquer ensaio a temperatura da peça estava alta não sendo possível a retirada do corpo de prova retificado diretamente com as mãos.

A influência da alteração da espessura equivalente de corte na força tangencial de corte também foi observada por Malkin (1989) e Bianchi et al. (2001). A redução da espessura equivalente de corte diminuiu as forças tangenciais de corte.

Segundo Bianchi et al. (2000) o aumento do desgaste do aglomerante tende a diminuir a ancoragem dos grãos pelo aumento das tensões atuantes na interface entre aglomerante e grão abrasivo, e que, um desgaste dos grãos tende a diminuir a tensão atuante na interface mencionada, uma vez que o desgaste faz com que o momento aplicado ao grão abrasivo diminua.

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 forças de corte. (FUSSE, 2004)

Os baixos valores de força tangencial de corte obtidos (menores que 15 N) devem-se a utilização do rebolo de CBN, já que é gasta uma menor energia para a retificação com este, devido a maior dureza de seus grãos (Tabela 2.1) (SCHUITEK et al., 2001).

O efeito do processo de dressagem na topografia do rebolo de CBN influencia também no comportamento da força tangencial de corte durante os ciclos de retificação. Como a dressagem foi realizada de forma lenta e gradual, a superfície no topo dos grãos abrasivos apresentou grandes áreas de contato, o que acarretou na geração inicial de maiores forças tangenciais de corte.

Com relação à variação da vazão de fluido de corte de 40, 60 e 80ml/h para a condição de MQL, notou-se uma diminuição da força de corte com o aumento da vazão do fluido. A condição que apresentou o melhor desempenho com relação a lubri-refrigeração convencional foi com vazão de 80ml/h favorecendo a lubrificação na interface rebolo-peça.

Para os ensaios envolvendo lubri-refrigeração otimizada obtiveram-se melhores resultados que para a lubri-refrigeração convencional e MQL, sendo a lubri-refrigeração otimizada com velocidade de saída de fluido de corte igual a 30m/s a condição com menores forças tangenciais de corte.

A técnica otimizada apresentou as menores forças tangenciais de corte comparado aos sistemas convencional e MQL. No entanto os valores de força obtidos estão dentro de valores aceitáveis para processos de retificação.

4.2. ENERGIA ESPECÍFICA DE RETIFICAÇÃO

Neste item são apresentados os resultados das energias específicas de retificação (J/mm^3) em função do número de ciclos de retificação e sistemas de aplicação do fluido de corte, calculados conforme Equação 2.6.

Um dos parâmetros fundamentais para a caracterização de processos de usinagem é a energia específica de retificação que é a energia gasta por unidade de volume de remoção de material. Esta energia está relacionada com a potência e força (SILVA et al., 2000).

A energia específica de retificação é uma variável de saída relacionada diretamente com a força tangencial de corte e a velocidade periférica do rebolo. No entanto é afetada por outros parâmetros do processo como largura de retificação e velocidade tangencial da peça.

4.2.1 Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na energia específica de retificação.

A Figura 4.6 apresenta a média das energias específicas de retificação máximas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de lubri-refrigeração otimizada utilizada durante todo o processo de retificação constituído por 100 ciclos de usinagem.

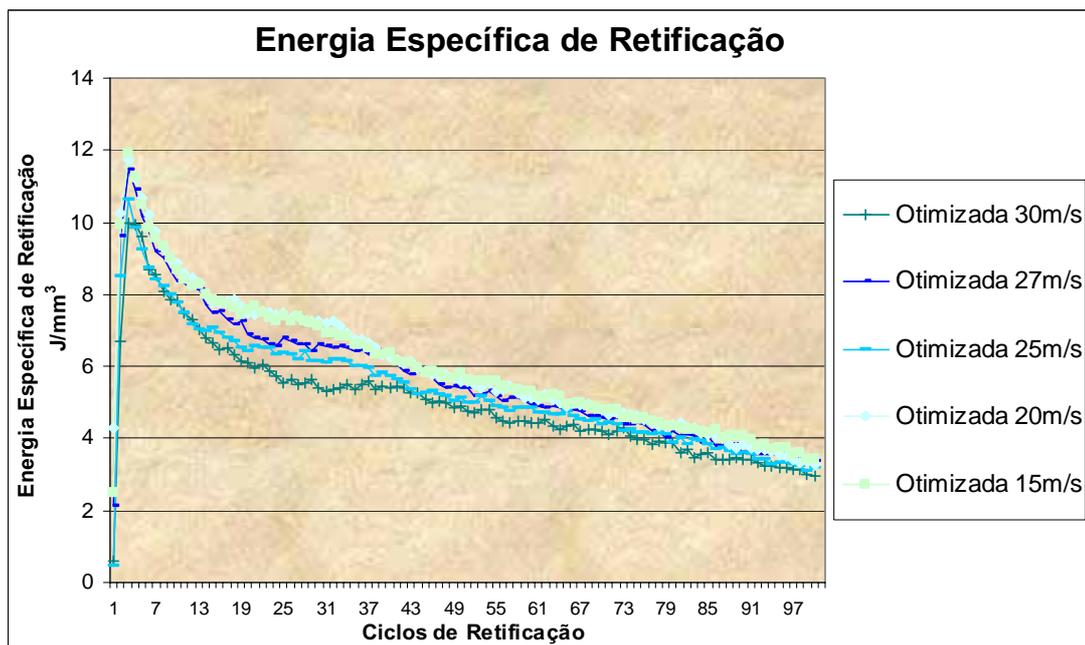


Figura 4.6– Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na energia específica de retificação

Observando a Figura 4.6, nota-se as menores energias específicas de retificação para as maiores velocidades de aplicação de fluido de corte. As maiores diferenças foram obtidas próximo ao vigésimo quinto ciclo de retificação, mostrando que neste ponto há uma maior importância da velocidade do fluido de corte garantido menores energias específicas de retificação. Isso se deve principalmente ao fato de que próximo a este ciclo deva começar a ocorrer um desgaste do grão abrasivo, levando a uma perda da afiação da ferramenta. Para maiores velocidades de fluido de corte essa perda de afiação é diminuída devido ao maior poder lubrificante reduzindo o desgaste por atrito.

4.2.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na energia específica de retificação.

A Figura 4.7 apresenta a média das energias específicas de retificação máximas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL.

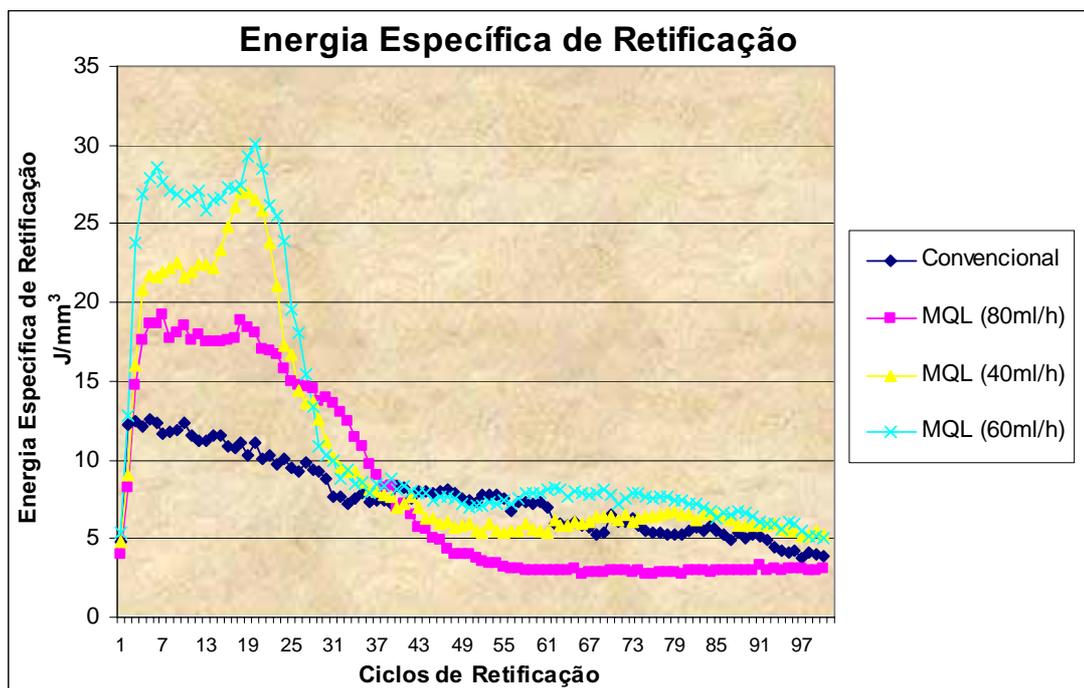


Figura 4.7– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na energia específica de retificação.

Em relação as diferentes vazões de fluido de corte no sistema MQL verifica-se que o mesmo comportamento obtido para as forças tangenciais de corte. Há uma tendência das maiores vazões de fluido de corte proporcionarem menores energias de retificação devido ao maior poder lubrificante quando aplicado com vazões diminuído o efeito do atrito gerado.

Pode-se observar que quando se aproxima do vigésimo ciclo de retificação, da mesma maneira que ocorreu com a força tangencial de corte, ocorre um aumento devido principalmente à perda de afiação dor rebolo.

As mesmas considerações feitas na análise das forças tangenciais de corte são válidas para a análise da energia específica de retificação. Isso se deve ao fato de que a energia específica de retificação está diretamente associada a força tangencial de corte. Pode-se notar que as curvas para força tangencial de corte e energia específica de retificação apresentaram praticamente a mesma tendência.

Comparando o sistema MQL com o sistema convencional, houve um acréscimo da energia específica e retificação para o sistema MQL, principalmente até o trigésimo ciclo de retificação, demonstrando que o sistema MQL não proporcionou o mesmo poder lubrificante

proporcionado pelo sistema convencional. No entanto os valores obtidos com o MQL está dentro de valores aceitáveis para o processo de retificação (MALKIN, 1989).

4.2.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na tensão residual na energia específica de retificação.

A Figura 4.8 apresenta a média das energias específicas de retificação máximas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas, permitindo avaliar e comparar os métodos entre si.

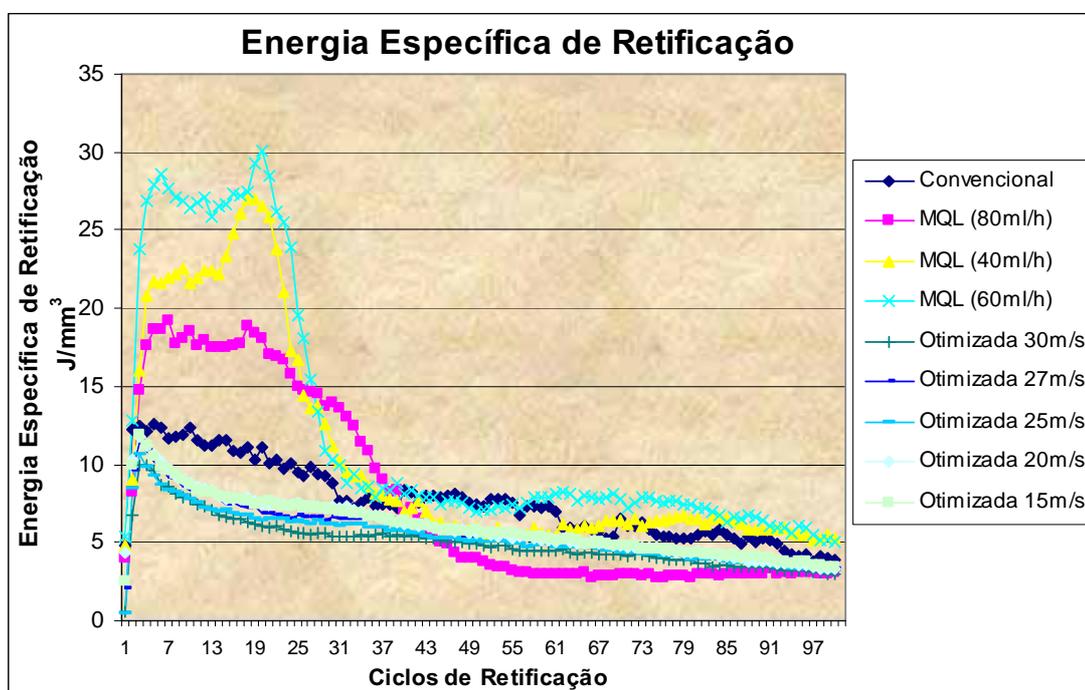


Figura 4.8– Análise das formas de aplicação de fluido de corte na Energia Específica de retificação.

Analisando-se a Figura 4.8 têm-se que o comportamento da energia específica de retificação foi semelhante ao apresentado para a força tangencial de corte, porém as curvas desta variável de saída tendem a se elevar em função da redução do diâmetro do corpo de prova ao longo dos ensaios. Desta forma, as análises realizadas para as forças tangenciais de corte podem ser estendidas para esta variável de saída, pois os momentos de maiores e menores solicitações da ferramenta abrasiva para ambas as variáveis são iguais, conforme também observado por Silva et al. (1999).

A utilização desta variável deve-se ao fato de que ela considera a força tangencial de corte, a velocidade periférica instantânea da ferramenta abrasiva e o diâmetro real da peça, o qual se reduz ao longo dos ciclos de retificação.

É importante salientar que o comportamento da energia específica de retificação verificado neste trabalho foi na maioria das vezes inferior a 60 J/mm^3 , citada por Malkin (1989) como valor máximo para o processo de retificação de aços.

No caso da lubri-refrigeração convencional, o que manteve as energias específicas de retificação, às vezes, inferiores às observadas pelo pesquisador acima citado, foi possivelmente a elevada vazão utilizada.

Da mesma forma que para as forças tangenciais de corte, notou-se uma diminuição da energia específica de retificação com o aumento da vazão do fluido. A condição que apresentou o melhor desempenho com relação à lubri-refrigeração convencional foi com vazão de 80ml/h de fluido de corte. A lubri-refrigeração otimizada apresentou resultados melhores que as outras formas de lubri-refrigeração sendo que para a condição com velocidade de fluido de corte de 30m/s obteve-se os melhores resultados entre todas as condições ensaiadas.

O melhor comportamento demonstrado pelo método otimizado deve provavelmente à melhor eficiência da penetração do fluido de corte proporcionada por este método devido às altas velocidades de aplicação utilizadas.

Além disso, a maior quantidade de lubrificante proporcionada pelo método otimizado em relação aos outros métodos contribui para a redução do atrito peça e rebolo, proporcionando ao cavaco um deslizamento mais fácil.

4.3. EMISSÃO ACÚSTICA

Devido ao baixo custo e do tamanho dos sensores atuais para a obtenção da emissão acústica gerada durante processos de usinagem essa técnica deve começar a ser usada com mais frequência pelas indústrias.

Neste Capítulo são apresentados os resultados de emissão acústica utilizando três diferentes formas de lubri-refrigeração (MQL, MO, MC) na retificação do aço ABNT 4340 temperado e revenido. Os resultados de emissão acústica (RMS) estão expressos em Volts (V) e são apresentados em função do número de ciclos de retificação, variando-se os sistemas de lubri-refrigeração.

4.3.1 Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na emissão acústica

A Figura 4.9 apresenta a média das emissões acústicas máximas produzidas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de lubri-refrigeração otimizada utilizada durante todo o processo de retificação.

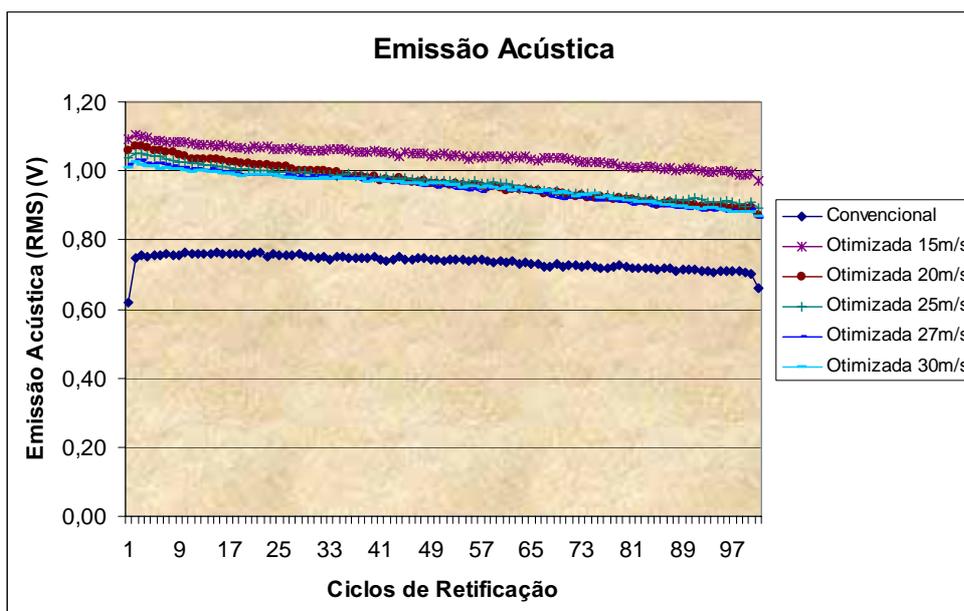


Figura 4.9– Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na emissão acústica.

Em relação as diferentes velocidades de aplicação do fluido de corte utilizadas no método otimizado, verifica-se que a aplicação com velocidade do jato de fluido de corte com 15m/s apresentou as maiores emissões acústicas. Nota-se ainda que até próximo ao quadragésimo ciclo de retificação há uma tendência de maiores emissões acústicas para menores velocidades de fluido de corte. A aplicação convencional apresentou menores emissões acústicas que a aplicação otimizada, mantendo-se quase constantes. Fato este devido aos menores esforços de corte apresentados para o método otimizado que facilitou a remoção dos cavacos da zona de corte.

O comportamento das emissões acústicas para os sistemas otimizado e convencional durante os ciclos de retificação pode ser justificado através da capacidade de remoção de cavaco proporcionado por cada método. As altas velocidades e altas pressões proporcionadas pela técnica otimizada minimiza a tendência de entupimento dos poros por cavacos. Quanto menos cavacos impregnados nos poros do rebolo maior a atuação dos grãos abrasivos

proporcionando um maior poder de corte do rebolo e proporcionando também maiores emissões acústicas. Deve-se considerar ainda as emissões geradas pelo maior impacto proporcionado pelo fluido na aplicação otimizada favorecendo o aparecimento de maiores emissões acústicas.

A variação da velocidade de aplicação do fluido de corte mostrou que as menores emissões acústicas foram obtidas para as velocidades de saída do fluido de 30 m/s e 27 m/s, visto que com a utilização destas velocidades o fluido penetrou de forma mais eficiente na região de corte, facilitando o arrancamento do cavaco. Porém, as diferenças percentuais existentes entre os valores de emissões acústicas encontradas para todas as relações de velocidade utilizadas para as condições otimizadas foram reduzidas.

Segundo Silva et al. (2000), o sinal de emissão acústica pode ser considerado como um bom indicador do número de grãos ativos em contato com a peça por unidade de tempo.

As menores velocidades proporcionaram uma tendência de apresentarem as maiores forças tangenciais de corte e, por consequência, os maiores valores de emissões acústicas. Fato observado por outros pesquisadores Silva et al. (1999), Junior (1996) e Alves (2005).

4.3.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na emissão acústica

A Figura 4.10 apresenta a média das emissões acústicas máximas produzidas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL.

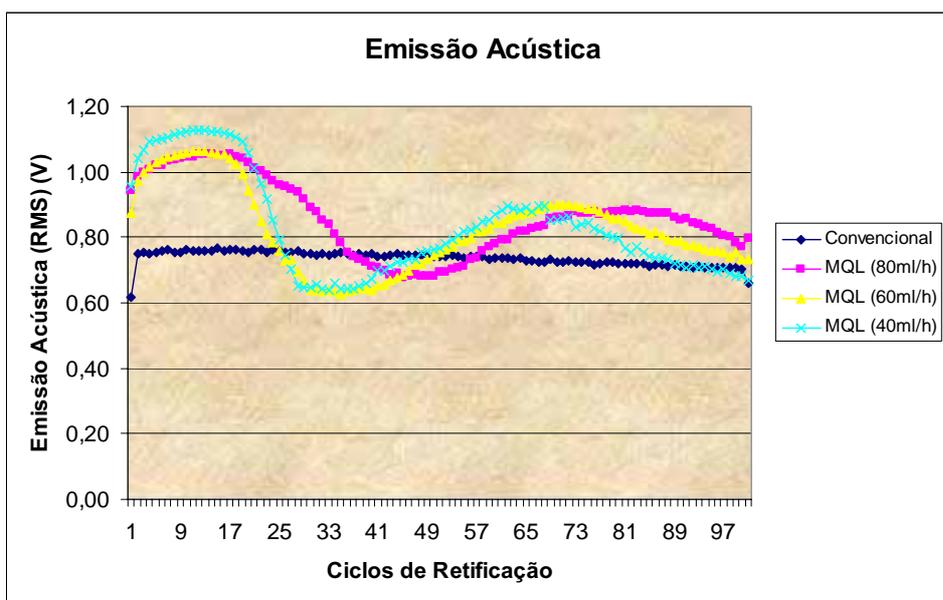


Figura 4.10– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na emissão acústica.

Entre as condições de usinagem utilizando a técnica da MQL, a condição com vazão do lubrificante igual a 80ml/h obteve os melhores resultados, com valores que oscilaram próximo aos valores obtidos com a lubri-refrigeração convencional. Percebe-se ainda uma menor variação da emissão acústica para maiores vazões de fluido de corte.

Para todas as condições com mínima quantidade de lubrificação os sinais de emissão acústica apresentaram grandes variações devidas, principalmente, à menor lubricidade proporcionada por este método. Nos primeiros ciclos de retificação o nível de emissão acústica para o método MQL para todas as condições ensaiadas apresentou-se elevado. A emissão acústica tem uma drástica queda a partir do vigésimo ciclo de retificação. Este mesmo comportamento pôde ser observado para as forças tangenciais de corte, que se iniciaram muito elevadas e decaiu rapidamente a partir do vigésimo ciclo.

Pode-se observar que até próximo ao vigésimo ciclo de retificação a emissão acústica apresenta-se elevada devido principalmente ao empastamento do rebolo. Os parâmetros de corte utilizados (a , V_c) produziram inicialmente uma taxa de remoção que a vazão de ar comprimido não foi capaz de remover totalmente. Com o passar dos ciclos de retificação a taxa de remoção era diminuída (menor diâmetro) fazendo com que o sistema MQL fosse capaz de remover os cavacos já impregnados e não deixando com que os novos cavacos formados se depositassem no rebolo favorecendo o corte da peça. Neste momento ocorre a diminuição da emissão acústica.

A partir do 50º ciclo de retificação um novo aumento da emissão acústica para as três condições MQL utilizadas. Fato este explicado pela perda de afiação dos grãos abrasivos. A perda da afiação deve-se principalmente ao desgaste acentuado dos grãos devido à menor lubrificação gerada pelo MQL. Os grãos passam a se tornar planos fazendo com que aumente a tensão sobre eles. No entanto a emissão acústica volta a decair devido principalmente a friabilidade dos grãos abrasivos o que faz com que o rebolo volte a apresentar capacidade de corte.

A emissão acústica volta a aumentar a partir do quadragésimo ciclo devido a uma leve perda da afiação do rebolo.

A condição com vazão do lubrificante igual a 40ml/h obteve os valores mais altos de emissão acústica, mostrando que a refrigeração não foi tão eficaz na região de corte.

4.3.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na emissão acústica

A Figura 4.11 apresenta a média das emissões acústicas máximas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas, permitindo avaliar e comparar os métodos entre si.

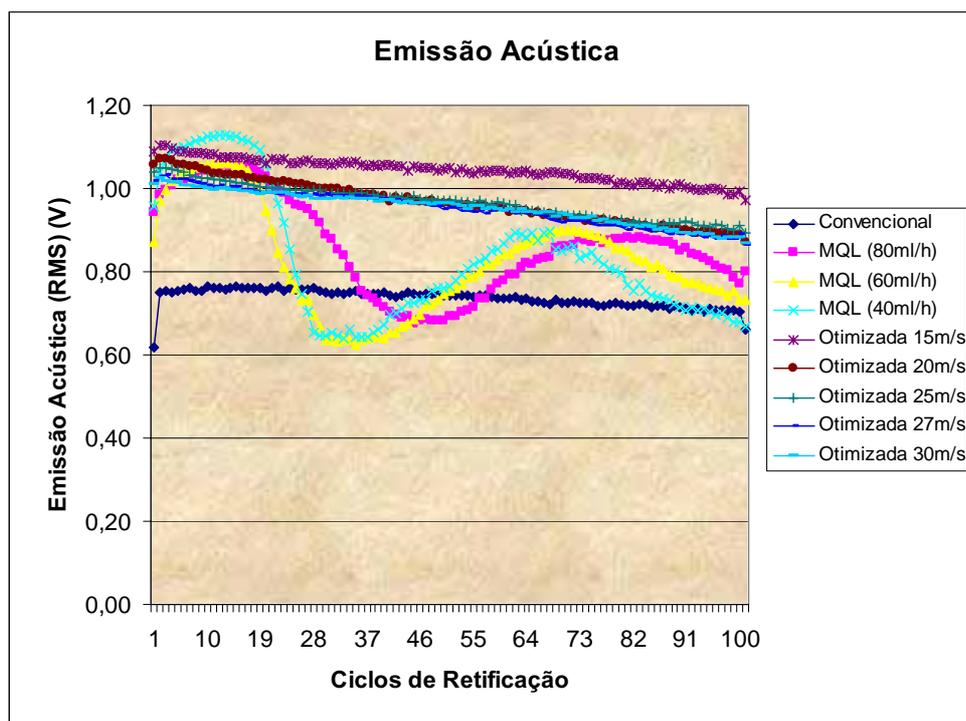


Figura 4.11– Análise das formas de aplicação de fluido de corte na emissão acústica

A comparação entre as condições de usinagem com a técnica da MQL, otimizada e a lubri-refrigeração convencional, percebe-se que o comportamento da lubri-refrigeração convencional foi mais constante que a técnica da MQL e obtiveram-se os menores valores de emissão acústica.

A seguir é apresentado, nas Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20, de forma esquemática, gráficos de emissão acústica para cada condição ensaiada em função do tempo de ensaio (segundos) de forma a observar as diferenças ocorridas durante todos os 100 ciclos de retificação. Nestes gráficos estão os 2.760.000 pontos obtidos durante cada ensaio. Fazem-se necessários estes gráficos devido ao comportamento da mínima emissão acústica para cada condição apresentar diferenças significativas. Convém ressaltar que estes gráficos foram gerados pelo sistema de aquisição de dados utilizado nesta pesquisa.

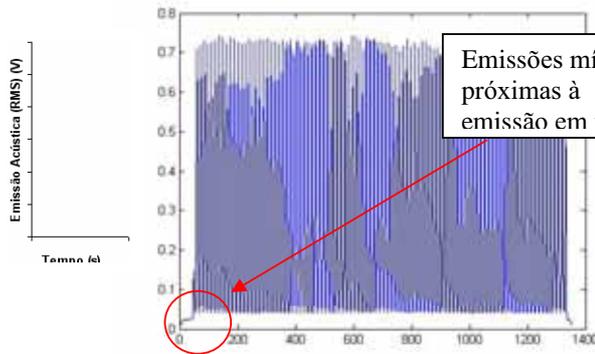


Figura 4.12– Ensaio 2 (Convencional)

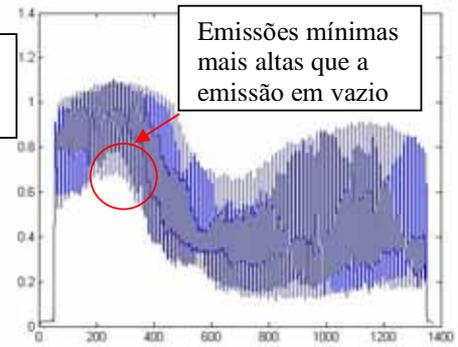


Figura 4.13– Ensaio 7 (MQL 80ml/h)

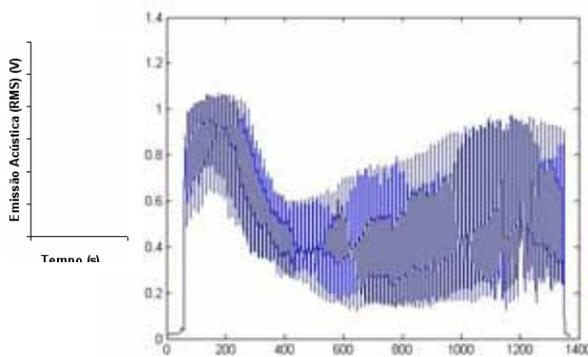


Figura 4.14– Ensaio 12 (MQL 60ml/h)

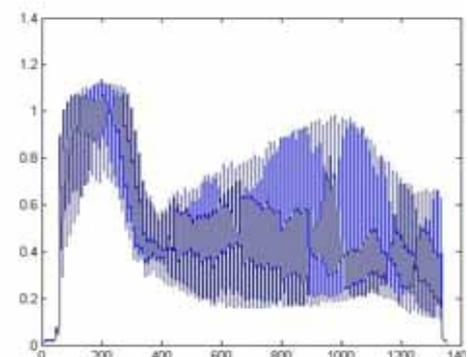


Figura 4.15– Ensaio 17 (MQL 40ml/h)

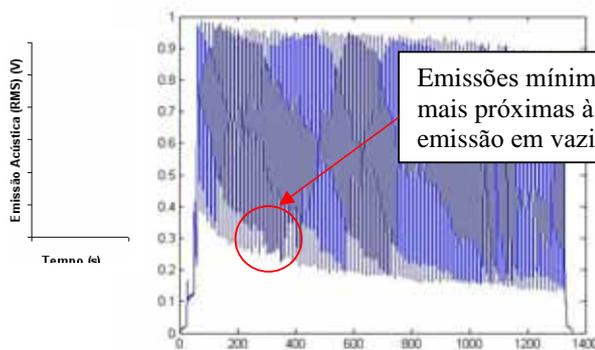


Figura 4.16– Ensaio 25 (otimizada
30m/s)

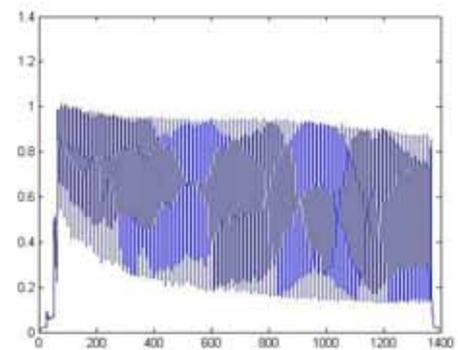


Figura 4.17– Ensaio 20 (otimizada
27m/s)

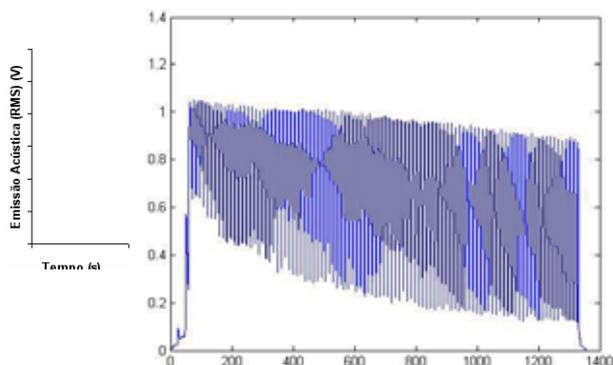


Figura 4.18– Ensaio 25 (otimizada 25 m/s)

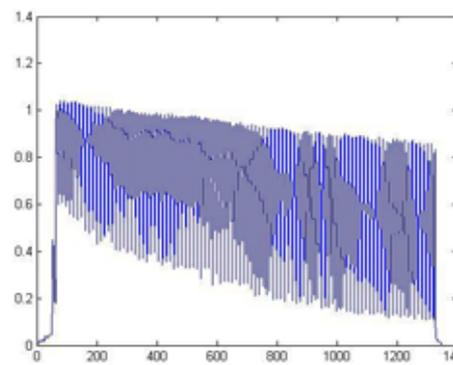


Figura 4.19– Ensaio 40 (otimizada 20m/s)

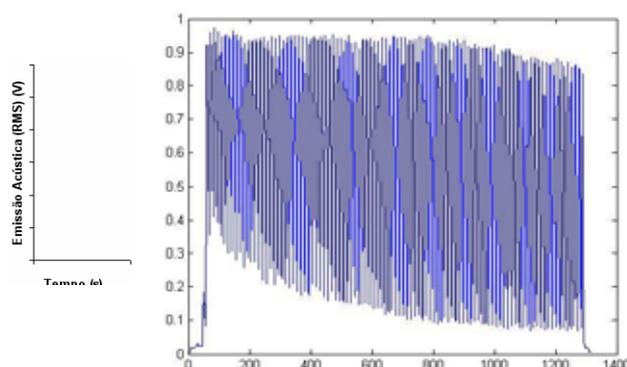


Figura 4.20– Ensaio 45 (otimizada 15m/s)

A análise dos gráficos das Figuras 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 permitem concluir que as emissões acústicas mínimas para sistemas otimizados estão mais próximas das emissões acústicas obtidas quando não há contato do rebolo com o corpo de prova (emissão em vazio). Estas emissões acústicas mínimas diminuem à medida que os ciclos de retificação acontecem.

Para os ensaios envolvendo lubri-refrigeração convencional percebe-se que as emissões acústicas mínimas estão praticamente nos níveis da emissão em vazio (Figura 4.12). Isto implica que no término do centelhamento (tempo sem avanço do rebolo sobre a peça) quase não existe contato peça com rebolo.

No caso dos sistemas MQL, as Figuras 4.13, 4.14, 4.15 permite concluir, da mesma forma que para as forças tangenciais de corte, as emissões acústicas até o vigésimo ciclo, aproximadamente, ficaram muito acima da emissão em vazio. O tempo de centelhamento de 8 segundos não foi suficiente para que todo o material contido na profundidade de avanço fosse removido e/ou as deformações geradas não foram totalmente recuperadas. Isso se deve ao

menor poder de corte obtido nesta parte do ensaio. Fica evidente que o rebolo não estava cortando, ou seja, ou o rebolo estava sem afiação dos grãos abrasivos provocado pelo desgaste por atrito ou o rebolo encontrava-se empastada estando com os poros obstruídos por cavacos.

Nos ensaios envolvendo MQL percebe-se ainda que após o vigésimo ciclo de retificação as emissões acústicas mínimas estão próximas dos níveis da emissão em vazio. Não é possível observar diferenças significativas nas emissões mínimas em função da vazão de fluido de corte utilizado em cada condição MQL utilizada.

Para lubri-refrigeração otimizada e convencional as emissões acústicas apresentaram-se mais constantes, sem muitas variações, mostrando que estas formas de lubrificação foram capazes de manter a afiação do rebolo durante todo os ciclos de retificação.

Segundo Inasaki (1990), Existe uma relação entre a energia específica de retificação e os valores de emissão acústica, uma vez que tiveram a tendência de serem minimizadas com o aumento das velocidades de aplicação do fluido de corte.

Segundo estudos realizados por Junior (1996) onde comparou-se sinais de EA e as forças de corte em processo de retificação interna, a emissão acústica durante os ensaios aumentava com as forças de corte, provando que os sinais de EA podem ser utilizados para monitoramento dos valores de forças obtidos ao longo do processo.

4.4. RUGOSIDADE

A importância da análise desta variável deve-se ao fato de que o acabamento superficial afeta de forma significativa a resistência dos componentes fabricados quando são submetidos a trabalhos onde são exigidos esforços de fadiga. A rugosidade de uma peça ainda está diretamente ligada à lubrificação e depende principalmente do tamanho do grão abrasivo presente no rebolo, condições de dressagem, taxa de remoção de material, tempo de centelhamento e condições de lubri-refrigeração (MALKIN, 1989).

Devido, portanto, à grande importância da rugosidade, realizou-se neste trabalho o levantamento desta variável. Os valores de rugosidade (R_a) são expressos em micrometros (μm) e são apresentados em função do número de ciclos de retificação, variando-se os sistemas de lubri-refrigeração.

Ressalta-se que os valores de rugosidade forma de gráficos de barras, com os respectivos desvios padrões. Cada barra corresponde a uma média aritmética dos valores obtidos para cinco peças retificadas sob as mesmas condições.

As Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 apresentam gráficos com os resultados obtidos para a rugosidade média R_a , referente à comparação entre a condição de lubri-refrigeração convencional, otimizada e MQL. Os valores de rugosidade apresentados são médias de 3 medições de rugosidade em posições diferentes, para cada um dos 5 ensaios realizados para cada condição de lubri-refrigeração, com seus respectivos desvios padrões.

4.4.1. Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na rugosidade

Na Figura 4.21 são apresentados os valores de rugosidade (R_a) medidos ao final de cada ensaio, ilustrando a influência da velocidade de aplicação do fluido (V_j) no método otimizado.

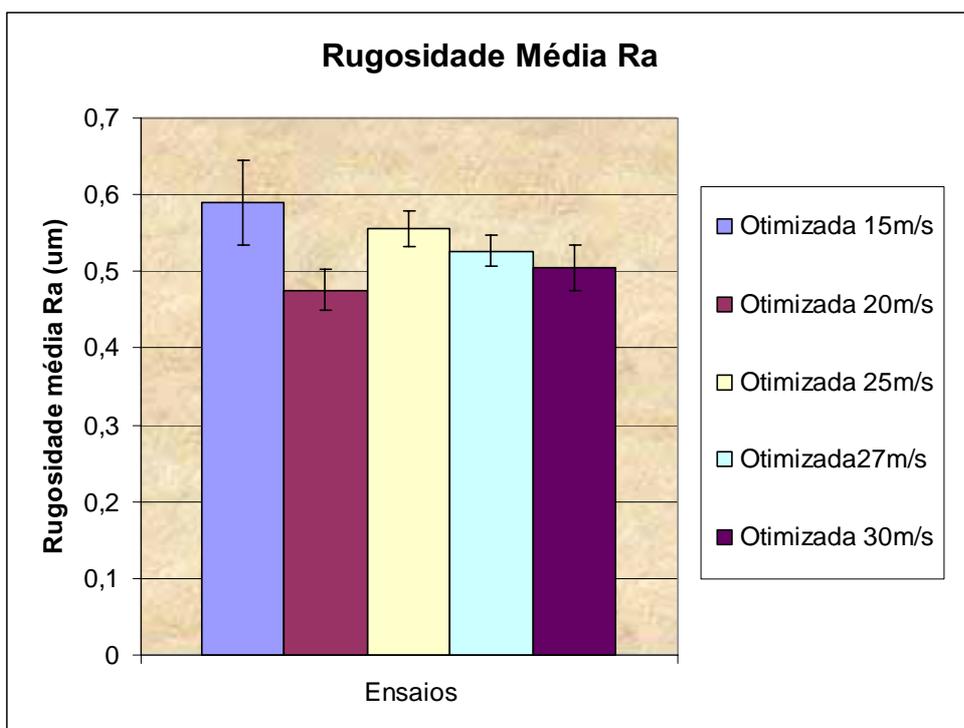


Figura 4.21– Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na rugosidade

Analisando-se a Figura 4.21 percebe-se que os menores valores de rugosidade foram obtidos, no geral, quando a velocidade de saída do fluido foi de 20m/s e 30m/s. Fato este observado por Webster (1995) que afirma que para uma relação entre velocidade de corte e velocidade do fluido de corte igual a 1 seria a melhor relação de velocidades para se obter as menores rugosidades. Percebe-se uma tendência de maiores rugosidades para menores

velocidades de aplicação do fluido de corte. Exceção para a condição otimizada com velocidade do fluido de corte com 20m/s que apresentou as menores rugosidades entre todas as condições otimizadas.

A melhor situação otimizada (velocidade do fluido de corte de 20m/s) em relação à rugosidade Ra média da peça ficou 40,7% menor que a pior condição otimizada que foi para a situação com velocidade do jato de fluido de corte de 15m/s.

As condições que proporcionaram uma lubrificação mais eficiente apresentaram menores rugosidades. Isso se deve ao fato de que em condições com maiores velocidades de fluido de corte maior é a presença de lubrificante favorecendo o corte através da diminuição do atrito e através da expulsão mais rápida dos cavacos gerados.

4.4.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na rugosidade

A Figura 4.22 apresenta a média das rugosidades produzidas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL.

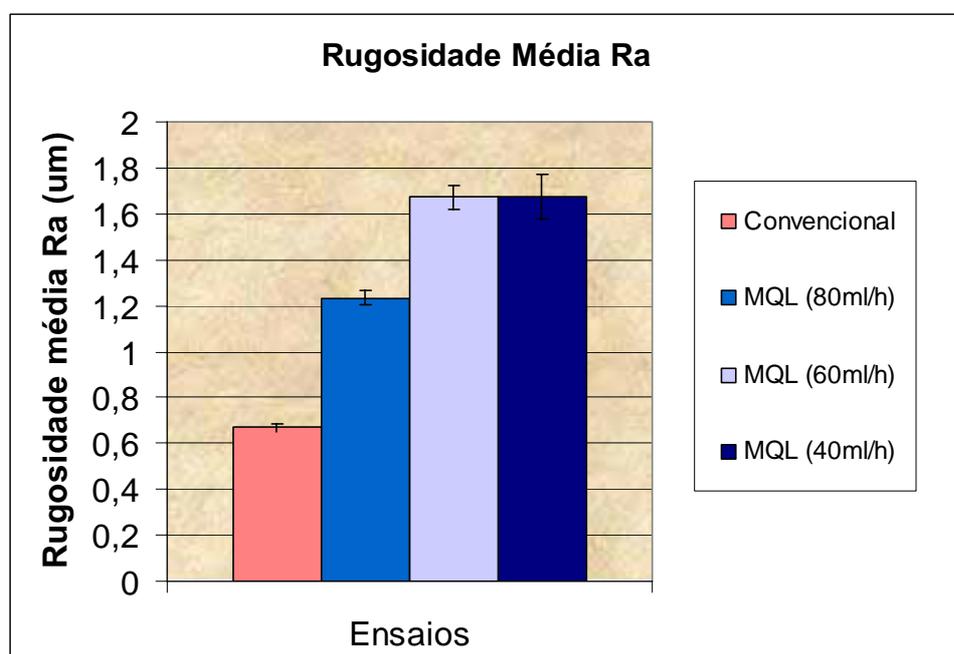


Figura 4.22– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na rugosidade

A análise da Figura 4.22 percebe-se que os menores valores de rugosidade utilizando a técnica MQL foram obtidos para vazões de fluido de corte de 80ml/h. A maior quantidade de

fluido de corte permitiu uma maior lubricidade evitando maiores danos por atrito, conseqüentemente melhorando a qualidade da peça.

A melhor situação MQL ($V_j=80\text{ml/h}$) em relação à rugosidade R_a média da peça ficou 27% menor que a pior condição MQL ($V_j=40\text{ml/h}$) e 45,5% maior que a condição convencional.

Percebe-se uma tendência de menores rugosidades para maiores vazões de fluido de corte em sistemas MQL. Nota-se ainda que a lubri-refrigeração convencional apresentou valores de rugosidade menores que o sistema MQL. Fato devido à grande quantidade de fluido entrando na região de corte.

Novamente as condições que proporcionaram uma lubrificação mais eficiente apresentaram menores rugosidades. Isso se deve ao fato de que em condições com menores velocidades de fluido de corte menor é a presença de lubrificante favorecendo o corte através da diminuição do atrito e através da expulsão mais rápida dos cavacos gerados.

A maior tendência de acúmulo de material nos poros do rebolo para os sistemas MQL, o que proporcionaria uma menor rugosidade, não foi capaz de possibilitar uma melhora na qualidade das peças produzidas, pois a influência da menor quantidade de lubrificante comparado com o sistema convencional foi mais pronunciado produzindo maiores rugosidades. No entanto o sistema MQL com vazão de fluido de 80ml/h apresenta rugosidade dentro dos limites aceitáveis para processo de retificação. As rugosidades encontradas nas condições de vazão de 60ml/h e 40ml/h estão no limite recomendado para processos de retificação (AGOSTINHO, 1997).

4.4.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na rugosidade

A Figura 4.23 apresenta as médias das rugosidades das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas.

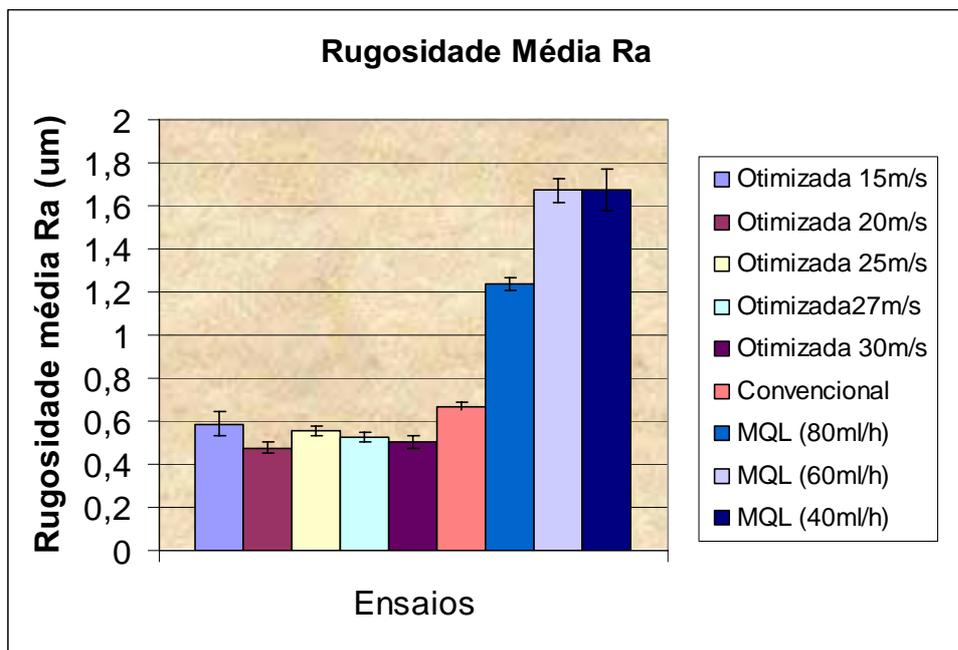


Figura 4.23– Análise das formas de aplicação de fluido de corte na rugosidade

Analisando-se os resultados obtidos observa-se de uma maneira geral que os valores de rugosidade foram menores para lubri-refrigeração otimizada, seguida pela lubri-refrigeração convencional e por último a técnica de MQL. Os menores valores para a utilização da MQL são quando utilizada vazão do lubrificante igual a 80ml/h, comprovando-se assim que a maior quantidade de fluido possibilitou menores valores de rugosidade devido a maior lubrificação alcançada.

A lubri-refrigeração convencional apresentou valores menores de rugosidade que a técnica de MQL, porém os valores obtidos com a vazão do lubrificante igual a 80ml/h são valores de rugosidade abaixo de grande parte de aplicações industriais.

A melhor situação otimizada (velocidade de fluido de 20m/s) em relação à rugosidade Ra média da peça ficou 71,7% menor que a melhor condição MQL (Q=80ml/h) e 47% menor que a condição convencional de aplicação de fluido de corte.

Os menores valores para a utilização do método otimizado foram obtidos para maiores velocidades de fluido de corte, comprovando-se assim que a maior quantidade de fluido possibilitou menores valores de rugosidade devido a maior lubrificação alcançada. Maiores velocidades do fluido de corte permitem a expulsão do cavaco mais rapidamente, colaborando para o melhor acabamento. As diferenças de rugosidade entre as formas otimizadas são pequenas, mas apresentam uma tendência de melhor qualidade para maiores velocidades de aplicação de fluido de corte. Resultado observado também por Alves (2005).

Pode-se dizer que a rugosidade da peça retificada é influenciada principalmente pelo tamanho do grão abrasivo do rebolo, centelhamento, dressagem, taxa de remoção do material e condições de lubrificação.

Segundo Bianchi et al (2001), condições que geram menores forças de tangenciais de corte geram também menores rugosidades. Fato observado também nesta pesquisa.

4.5. DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO DE CBN

O desgaste do rebolo se deve a três fatores principais: desgaste do aglomerante, desgaste do grão abrasivo e da friabilidade dos grãos. Está variável apresenta enorme importância no processo de retificação já que maiores desgastes significam menor vida do rebolo.

Como nesta pesquisa utilizou-se um rebolo de CBN com baixa concentração de abrasivos(15% volume) torna-se necessário, por questões econômicas, a avaliação do desgaste do rebolo. Rebolos com menor concentração de abrasivos tem seus grãos melhor contornados pelo aglomerante aumentando sua dureza dinâmica. A estrutura do rebolo tende a ser mais aberta em situações de menor concentração de grãos abrasivos.

Segundo Silva et al. (2000), o aumento do poder lubrificante proporcionado pelo fluido resulta na diminuição do desgaste do rebolo através da redução do atrito grão-peça e do atrito cavaco-ligante, permitindo que os grãos abrasivos permaneçam por mais tempo ao ligante ocasionando menor desgaste do rebolo.

Os valores do desgaste diametral do rebolo de CBN são apresentados em micrometros (μm) variando-se os sistemas de lubri-refrigeração.

Nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 são apresentados os valores do desgaste diametral do rebolo de CBN medido ao final de cada ensaio.

4.5.1. Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada no desgaste diametral do rebolo de CBN

Na Figura 4.24 são apresentados os valores do desgaste diametral do rebolo de CBN medidos ao final de cada ensaio, ilustrando a influência da velocidade de aplicação do fluido na lubri-refrigeração otimizada.

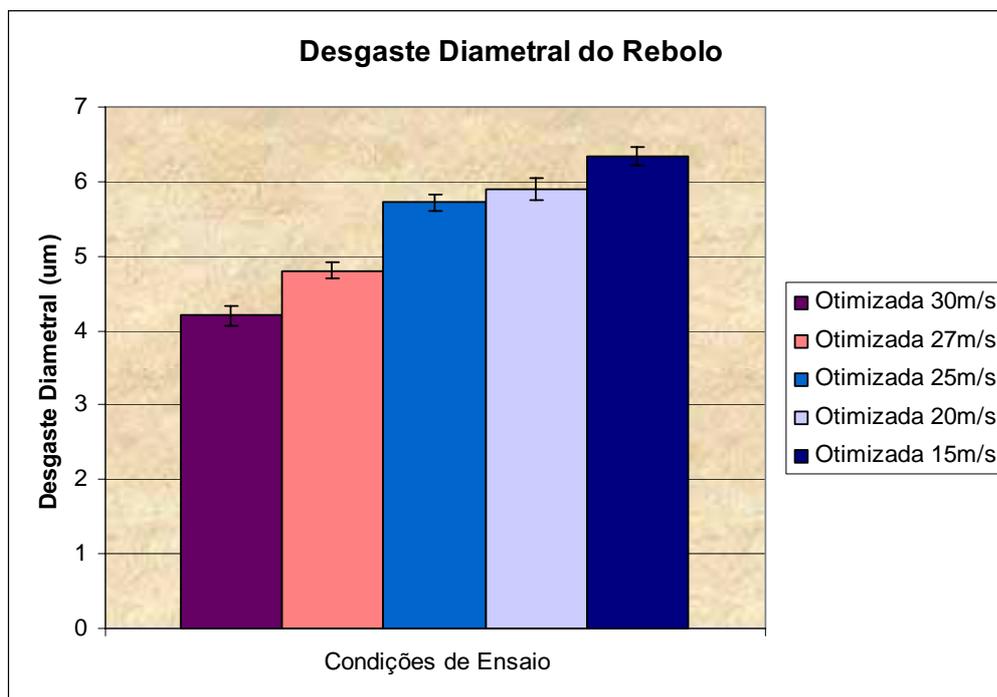


Figura 4.24– Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada no desgaste diametral do rebolo de CBN.

Segundo a Figura 4.24, para sistemas otimizados, menores valores de desgaste do rebolo foram obtidos para maiores velocidades de fluido de corte. A condição otimizada com velocidade de fluido de corte com 30 m/s apresentou os melhores resultados entre todas as condições otimizadas utilizadas.

O menor desgaste diametral médio do rebolo conseguido na técnica otimizada foi com velocidade de fluido de corte de 30m/s estando 33,88 % menor que para a situação com velocidade de fluido de 15m/s que apresentou os maiores desgastes da ferramenta na técnica otimizada.

A maior velocidade de fluido de corte melhorou a lubricidade, devido a maior presença de fluido de corte, diminuindo o atrito entre o rebolo e peça contribuindo para um menor desgaste do rebolo.

4.5.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL e método convencional no desgaste diametral do rebolo de CBN

A Figura 4.25 apresenta a média das rugosidades produzidas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL e método convencional.

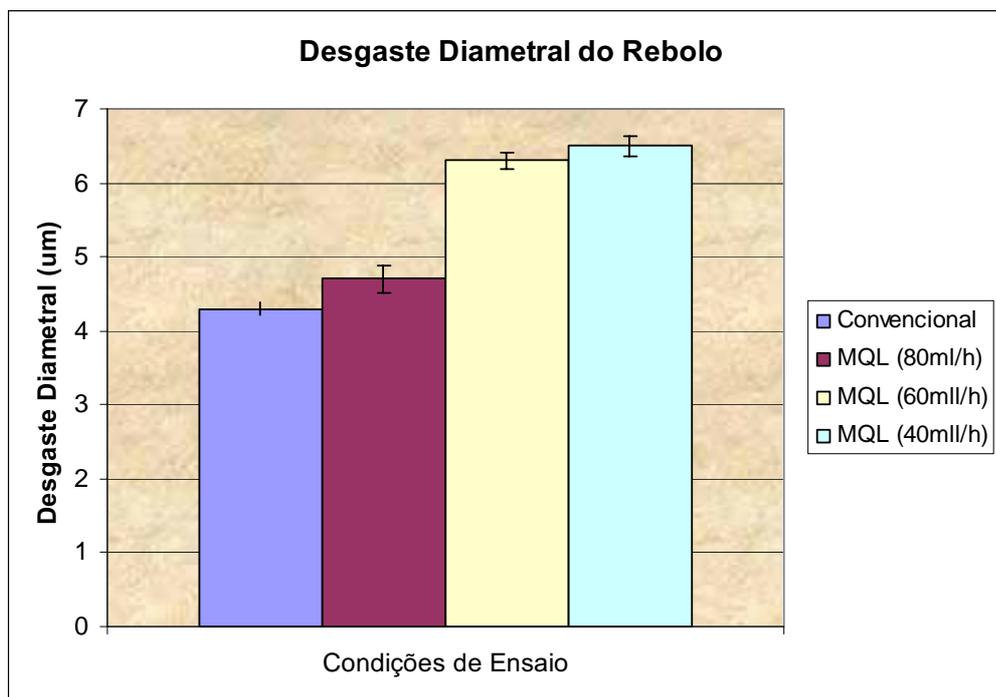


Figura 4.25– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL e método convencional no desgaste diametral do rebolo de CBN.

Com a Figura 4.25 nota-se que os menores valores de desgaste diametral do rebolo utilizando a técnica MQL foram obtidos para vazões de fluido de corte de 80ml/h. A maior quantidade de fluido de corte permitiu uma maior lubrificidade diminuindo o desgaste por atrito.

Nota-se ainda uma tendência de menores desgastes para maiores vazões de fluido de corte em sistemas MQL. Nota-se ainda que a lubri-refrigeração convencional apresentou valores de desgaste diametral do rebolo menor que o sistema MQL. Fato devido à maior quantidade de fluido entrando na região de corte favorecendo um menor desgaste por atrito além da emulsão proporcionar uma melhor refrigeração que o sistema MQL.

O menor desgaste diametral médio do rebolo conseguido na técnica MQL (80ml/h) foi 29,8 % menor que para a situação com vazão de 40 ml/h que apresentou os maiores desgastes da ferramenta. No entanto, a condição MQL com vazão de fluido igual a 80ml/h apresentou um desgaste 4,6% maior que para a técnica convencional.

4.5.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte no desgaste diametral do rebolo de CBN

A Figura 4.26 apresenta a média das rugosidades das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas.

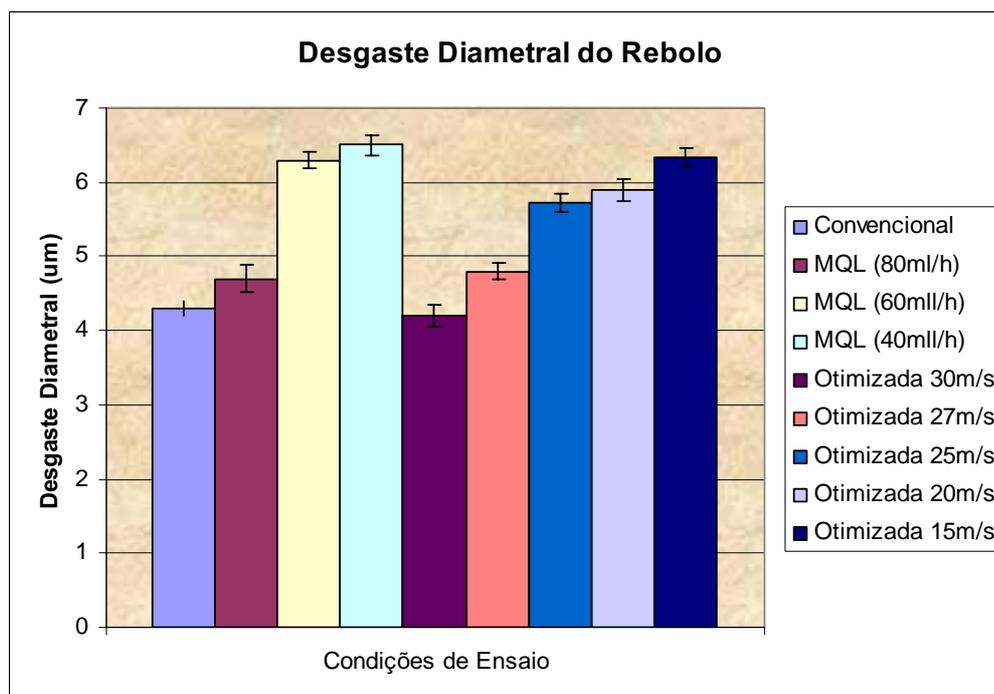


Figura 4.26– Análise das formas de aplicação de fluido de corte no desgaste diametral do rebolo de CBN.

Analisando a Figura 4.26 é possível notar que os valores obtidos do desgaste diametral para a técnica de MQL foram maiores que da condição de lubri-refrigeração convencional. Para a técnica de MQL, os menores valores de desgaste diametral foram obtidos quando utilizou-se a vazão do lubrificante em 80 ml/h, sendo que nesta situação o desgaste do rebolo atingiu valores próximos à técnica convencional e otimizada com $V_j=30\text{m/s}$.

A condição otimizada com velocidade de fluido de corte de 30m/s apresentou o melhor resultado de desgaste diametral do rebolo (4 µm), ficando abaixo inclusive da técnica convencional.

O desgaste do rebolo médio para a condição otimizada com velocidade do fluido de 30m/s foi 10,7 % menor que a melhor condição MQL obtida com vazão de 80ml/h e praticamente igual à condição convencional.

Segundo Kohli et al. (1995) menores desgastes da ferramenta de corte fazem com que este mantenha por mais tempo sua capacidade de corte reduzindo as energias relativas ao plowing e ao deslizamento de grãos cegos.

4.6. DESVIOS DE CIRCULARIDADE

Os valores do desvio de circularidade são expressos em micrometros (μm) variando-se os sistemas de lubri-refrigeração.

Os resultados para a circularidade foram obtidos para todas as condições de usinagem realizadas, sendo que para cada condição foram feitas três medições em posições diferentes da peça.

4.6.1. Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada no desvio de circularidade

Na Figura 4.27 são apresentados os valores do desvio de circularidade medidos ao final de cada ensaio, ilustrando a influência da velocidade de aplicação do fluido na lubri-refrigeração otimizada.

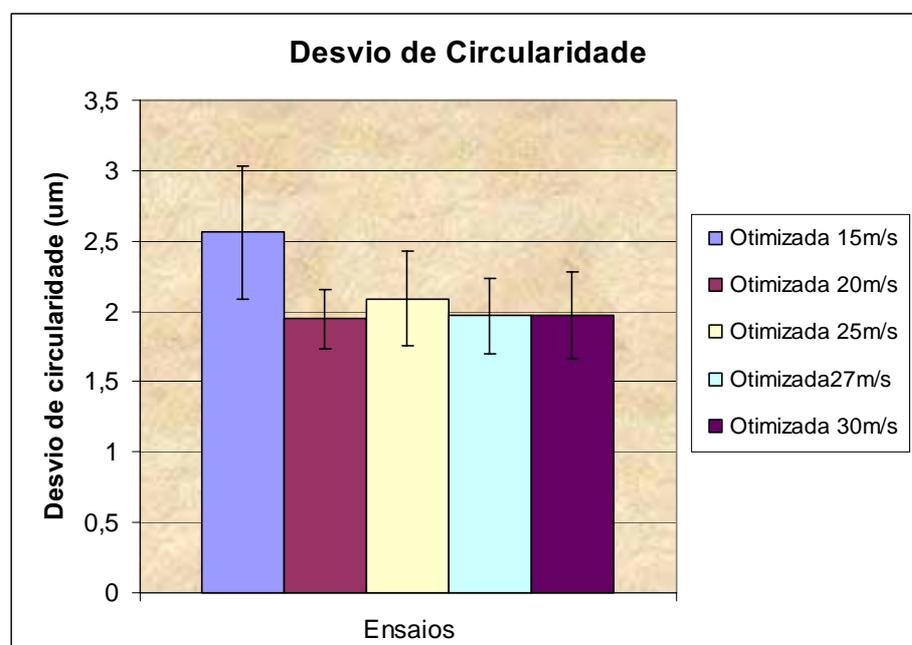


Figura 4.27– Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada no desvio de circularidade.

Observando a Figura 4.27 percebe-se os menores desvios de circularidade para maiores velocidades de fluido de corte na condição otimizada. No entanto, devido aos significativos desvios padrões apresentados não se pode afirmar essa tendência. Entretanto é possível afirmar que a técnica otimizada é capaz de produzir peças com baixos desvios de circularidade que ficaram entre 1,7 e 3,1 μm .

Na aplicação otimizada, a condição com velocidade do fluido de 30m/s apresentou os melhores resultados, sendo seu desvio de circularidade médio 23,5% menor que para a condição com $V_j=15\text{m/s}$ (maior desvio) e menor 47,4% que a condição convencional.

4.6.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL no desvio de circularidade

Na Figura 4.28 são apresentados os resultados do desvio de circularidade quando utilizado o método MQL.

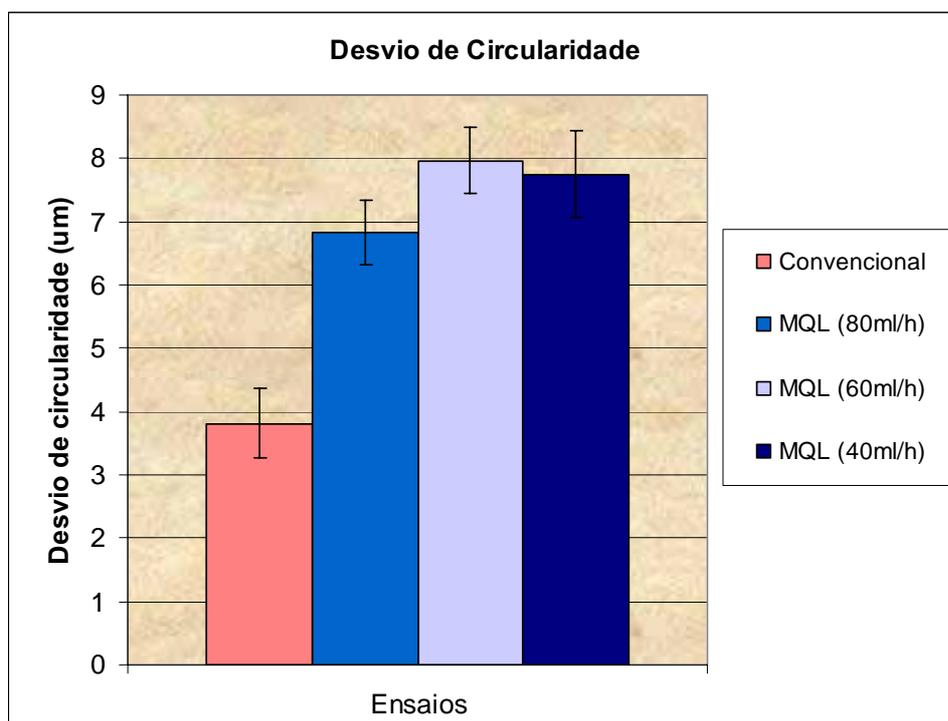


Figura 4.28– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL no desvio de circularidade

Em sistemas com mínima quantidade de lubrificação o desvio de circularidade médio apresentou-se maior em condições com menores vazões de fluido de corte. Exceção

apresentada para a condição MQL com 60ml/h de vazão de fluido de corte que apresentou os maiores desvios de circularidade.

A técnica MQL com vazão de 80ml/h foi a melhor condição deste sistema (MQL) em relação ao desvio de circularidade, sendo seu desvio de circularidade médio 14,5% menor que para a condição com vazão de 60ml/h (maior desvio) e maior 55,9% que a condição convencional.

A condição convencional apresentou menores desvios de circularidade que a técnica MQL com valores de até 50 % menores possivelmente devido à melhor refrigeração proporcionada diminuindo a variação dimensional da peça.

4.6.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte nos desvios de circularidade.

A Figura 4.29 apresenta os resultados do desvio de circularidade das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas.

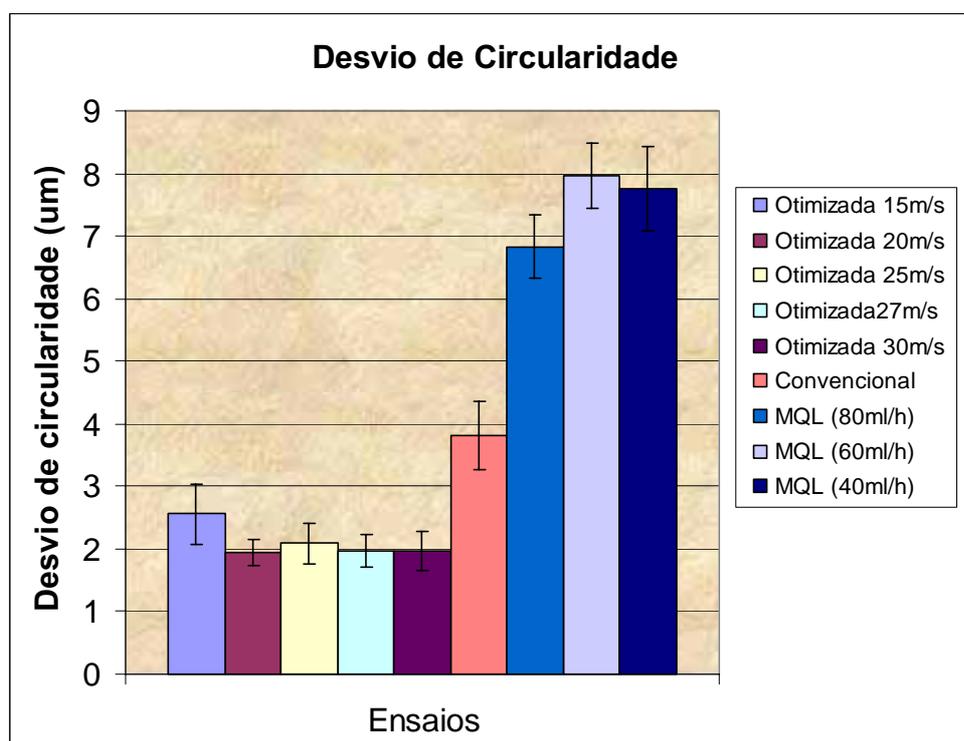


Figura 4.29– Análise das formas de aplicação de fluido de corte nos desvios de circularidade.

Analisando-se os resultados de circularidade obtidos pode-se observar que de um modo geral que para cada condição usando técnica otimizada os valores não apresentaram

diferenças significativas. No entanto a técnica otimizada apresentou resultados melhores que a convencional e a técnica MQL.

A quantidade de fluido de corte na técnica MQL mostrou-se de fundamental importância no desvio de circularidade.

A condição otimizada com velocidade de fluido de 30m/s foi a que apresentou o menor desvio de circularidade comparada a todas as outras condições e todas as outras técnicas. O desvio de circularidade médio para esta condição foi de 2 μ m sendo 70,5 % menor que a melhor condição MQL obtida com vazão de 80ml/h.

O valor máximo do erro de circularidade obtido foi 7,9 μ m para a condição de MQL com vazão do lubrificante igual a 60ml/h.

Quanto às relações de velocidades utilizadas para a lubri-refrigeração otimizada, nota-se que há uma tendência da circularidade melhorar mediante o aumento da velocidade de aplicação do fluido de corte na aplicação otimizada.

Outro fato relevante deve-se, segundo Kohli et al (1995), a alta condutibilidade térmica dos grãos de CBN que permite uma menor partição da energia gerada para a peça, facilitando desta maneira o controle dimensional desta e assegurando a integridade superficial do componente usinado.

Todos os valores dos desvios de circularidade apresentados estão dentro dos limites aceitáveis estabelecidos por Agostinho et al. (1997), entre 5 e 10 μ m.

4.7. MICRODUREZA

Com o objetivo de verificar a influência das formas de aplicação de fluido de corte na variação da dureza das peças retificadas optou-se por obter os valores de microdurezas para peças somente torneadas e revenidas e peças submetidas a ensaio a seco.

As Figuras 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 e 4.35 representam os resultados de microdureza obtidas pelo método Vickers e pelo método Knoop utilizando rebolo de CBN para análise comparativa entre as condições de lubri-refrigeração convencional (20l/min), MQL em três condições distintas (40, 60 e 80 ml/h) e para as cinco condições otimizadas ($V_j=30$ m/s, $V_j=27$ m/s, $V_j=25$ m/s, $V_j=20$ m/s, $V_j=15$ m/s).

Conforme já citado, a impressão Knoop, em função de seu formato estreito, possibilita o trabalho em regiões finas, ao contrário do indentador Vickers. Para uma mesma carga, a profundidade da impressão Knoop é menor do que a metade da profundidade obtida com a impressão Vickers (FERREIRA, 2004).

Para a análise da microdureza utilizou-se, para fins de comparação, corpos de prova retificados à seco (sem lubri-refrigeração) e corpos de prova torneado e temperado sem nenhuma retificação.

4.7.1. Resultados para Microdureza Vickers (HV)

4.7.1.1. Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na microdureza (escala Vickers)

Na Figura 4.30 é apresentado o resultado da microdureza Vickers média para as 5 (cinco) condições de lubri-refrigeração otimizada, comparando com o método convencional, com o ensaio a seco, com um corpo de prova somente torneado.

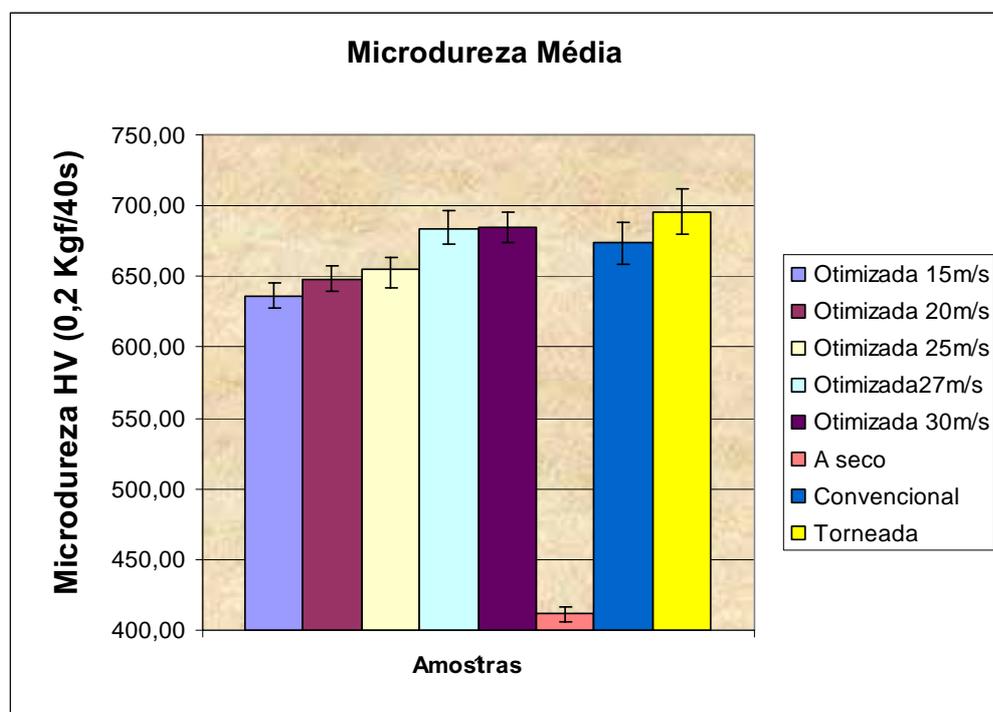


Figura 4.30– Microdureza Vickers média para condições otimizadas, método convencional, ensaio a seco, e peça somente torneada.

A microdureza Vickers obtida em 10 posições distintas revela que uma peça torneada e temperada, sem sofrer retificação, apresentou em média, os maiores valores de microdureza. Após a realização dos ensaios nas condições otimizadas, parte desta dureza é perdida, conforme pode ser verificado na Figura 4.30. Percebe-se que, mesmo com a situação de maior

velocidade de fluido de corte na condição otimizada, o calor gerado no processo de retificação faz com que a dureza seja diminuída.

O ensaio a seco, que teoricamente é a pior condição de retificação, apresentou os menores valores de microdureza, mostrando que o calor gerado nesta condição foi capaz de provocar um grande revenimento fazendo com que a dureza diminuísse, em média, 37% em relação à peça inicial.

Através da microdureza vickers média pode-se observar que existe uma tendência de que a perda de dureza seja diminuída para condições com maiores velocidades de fluido de corte em condições otimizadas. As condições com 27m/s e 30m/s de velocidade de fluido de corte apresentaram microdurezas superiores à condição convencional e muito próxima da condição inicial (peça torneada).

A maior variação média de dureza Vickers em relação à peça original (torneada) foi encontrada para a condição otimizada com velocidade do fluido de 15m/s, sendo que está apresentou dureza 8,61% menor, em média, que a peça torneada. Essa é a pior (menor dureza) condição em relação à variável de saída microdureza Vickers para a condição otimizada. A melhor condição para as condições otimizadas foi conseguida com a velocidade de fluido de corte de 30m/s que apresentou uma dureza 1,7 % menor que para a peça somente torneada.

4.7.1.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na Microdureza (escala Vickers)

Na Figura 4.31 é apresentado o resultado da microdureza Vickers média para as 3 condições MQL utilizadas, comparando com o método convencional, com o ensaio a seco, com um corpo de prova somente torneado.

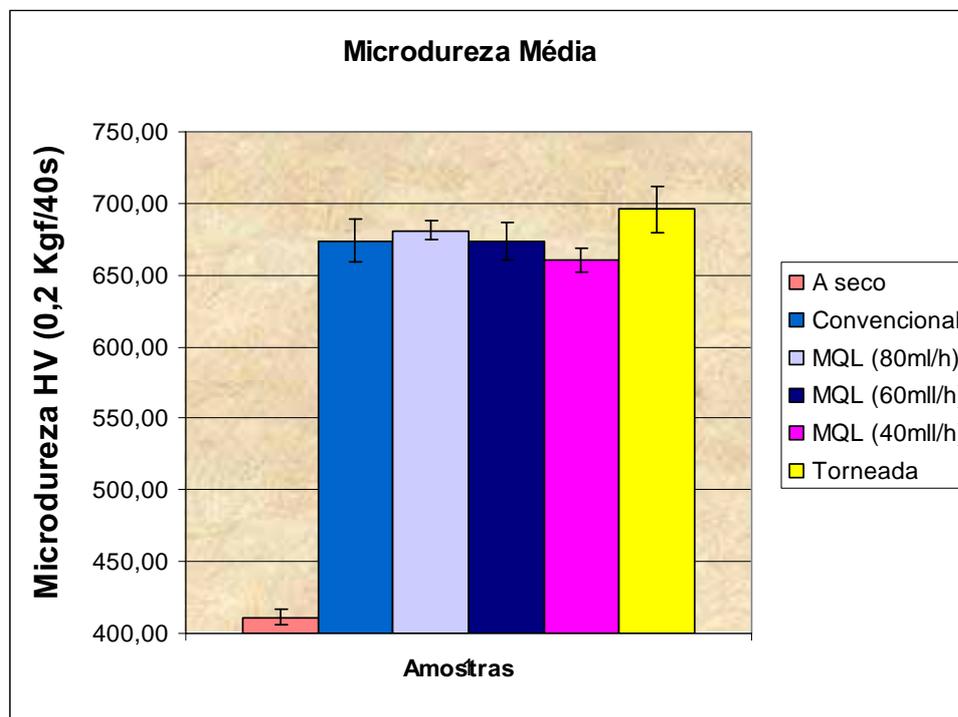


Figura 4.31– Microdureza Vickers média para condições de MQL, método convencional, ensaio a seco, e peça somente torneada.

Após a realização dos ensaios nas condições MQL, parte desta dureza é perdida ficando menor que a peça inicial (torneada), conforme pode ser verificado na Figura 4.31. Percebe-se que, mesmo com a situação de maior vazão de fluido de corte na condição MQL, o calor gerado no processo de retificação faz com que a dureza seja diminuída.

O ensaio a seco apresentou os menores valores de microdureza que são menores que para as condições MQL.

Através da microdureza vickers média pode-se observar que existe uma tendência de que a perda de dureza seja diminuída para condições com maiores vazões de fluido de corte em condições MQL. A condição com 80ml/h de vazão de fluido de corte apresentou microdurezas superiores à condição convencional e um pouco menor que a condição inicial (peça torneada).

A maior variação meia de dureza em relação à peça original (torneada) foi encontrado para a condição MQL com vazão fluido de 40m/s, sendo que está apresentou dureza 5,1% menor, em média, que a peça torneada. Essa é a pior (menor dureza) condição em relação à variável de saída microdureza Vickers para a condição MQL. A melhor condição para as

condições MQL foi conseguida com a vazão de 80ml/h que apresentou uma dureza 2,15 % menor que para a peça somente torneada.

4.7.1.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na Microdureza (escala Vickers)

A Figura 4.32 apresenta os resultados de microdureza Vickers médios para as condições de MQL, MO e MC utilizadas. É apresentado também o valor de microdureza vickers médio para ensaio de queima e peça somente torneada.

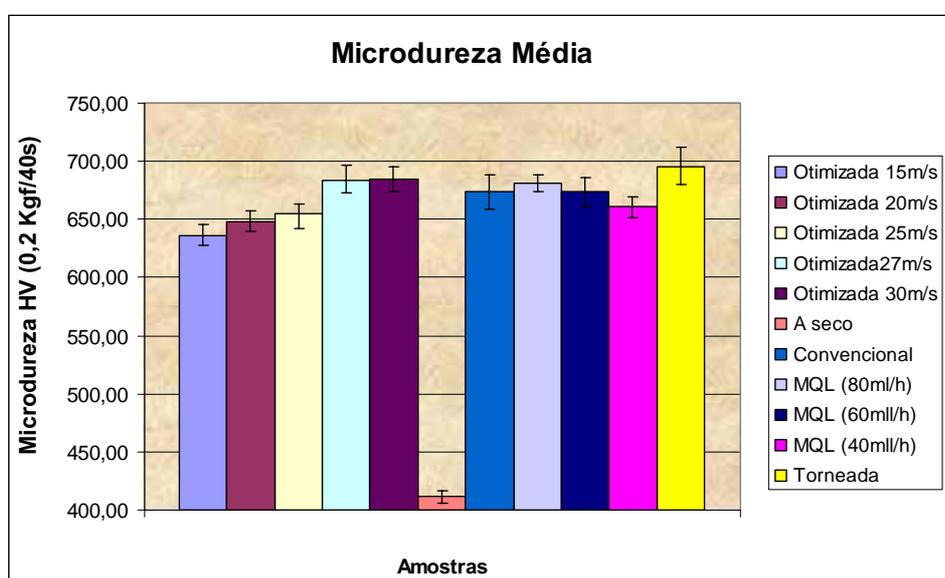


Figura 4.32– Microdureza Vickers médias para as condições de MQL, MO e MC, ensaio com queima e peça somente torneada.

A análise da microdurezas obtidas para a técnica otimizada, MQL e convencional permite concluir que, por mais eficiente que seja o método utilizado de lubri-refrigeração, existe uma pequena perda de dureza superficial. No caso de microdureza vickers essa análise é realizada em regiões mais profundas e nessas condições conclui-se que a maior velocidade de fluido de corte (30m/s) para técnicas otimizadas são capazes de proporcionar uma menor geração de calor minimizando a perda de dureza. Conclui-se ainda que a maior vazão de fluido de corte (80ml/h) para técnicas MQL são capazes de proporcionar uma menor perda de dureza. No entanto, uma técnica não se mostrou mais eficiente que a outra em termos gerais.

A microdureza Vickers para a melhor condição otimizada foi praticamente a mesma a melhor condição MQL, com uma diferença menor que 1%.

4.7.2. Resultados para Microdureza Knoop (HK)

4.7.2.1. Influência da velocidade de aplicação do fluido utilizando lubri-refrigeração otimizada na microdureza (escala Knoop)

Na Figura 4.33 é apresentado o resultado da microdureza Knoop média para as 5 (cinco) condições de lubri-refrigeração otimizada, comparando com o método convencional, com o ensaio a seco e com um corpo de prova somente torneado

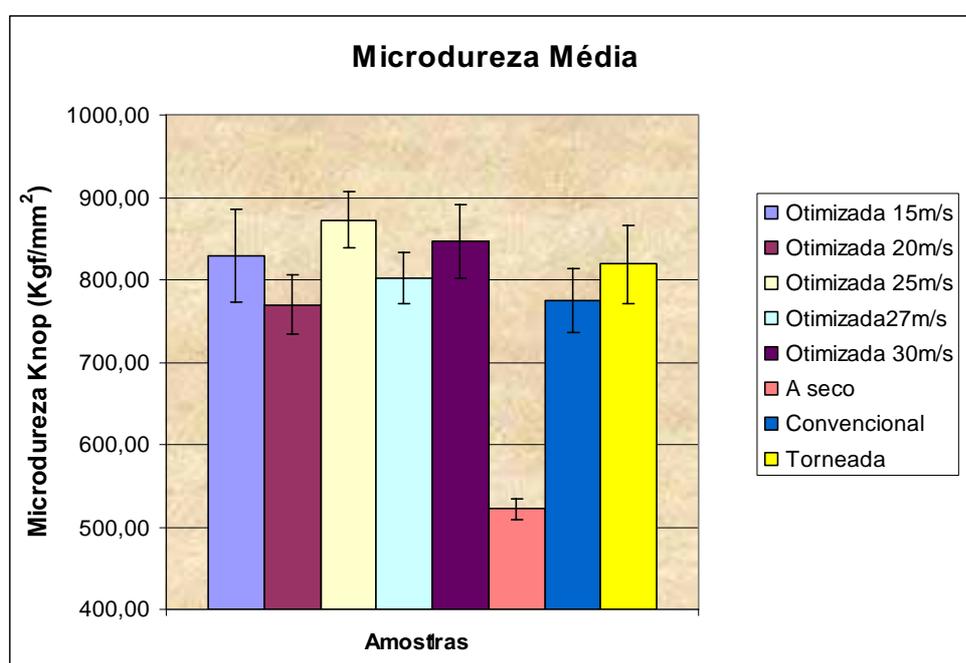


Figura 4.33– Microdureza Knoop média para condições otimizadas, método convencional, ensaio a seco e peça somente torneada.

O ensaio a seco, que teoricamente é a pior condição de retificação, apresentou os menores valores de microdureza Knoop.

Analisando as médias das microdurezas encontradas na escala Knoop, apesar do maior desvio padrão obtido, percebe-se que a condição otimizada foi capaz de manter a dureza original das peças (peça torneada) ficando com durezas muito acima das microdurezas encontradas para a condição a seco. Condição esta que novamente foi capaz de alterar significativamente a dureza da peça usinada.

A maior variação média de dureza em relação à peça original (torneada) foi encontrado para a condição otimizada com velocidade de fluido de 25m/s, sendo que está apresentou

6,8% a mais de dureza, em média, que a peça torneada. Essa é a melhor condição (maior dureza) em relação à variável de saída microdureza Knoop para a condição otimizada.

4.7.2.2. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na Microdureza (escala Knoop)

Na Figura 4.34 é apresentado o resultado da microdureza Knoop média para as 3 (três) condições MQL utilizadas, comparando com o método convencional, com o ensaio a seco e com um corpo de prova somente torneado.

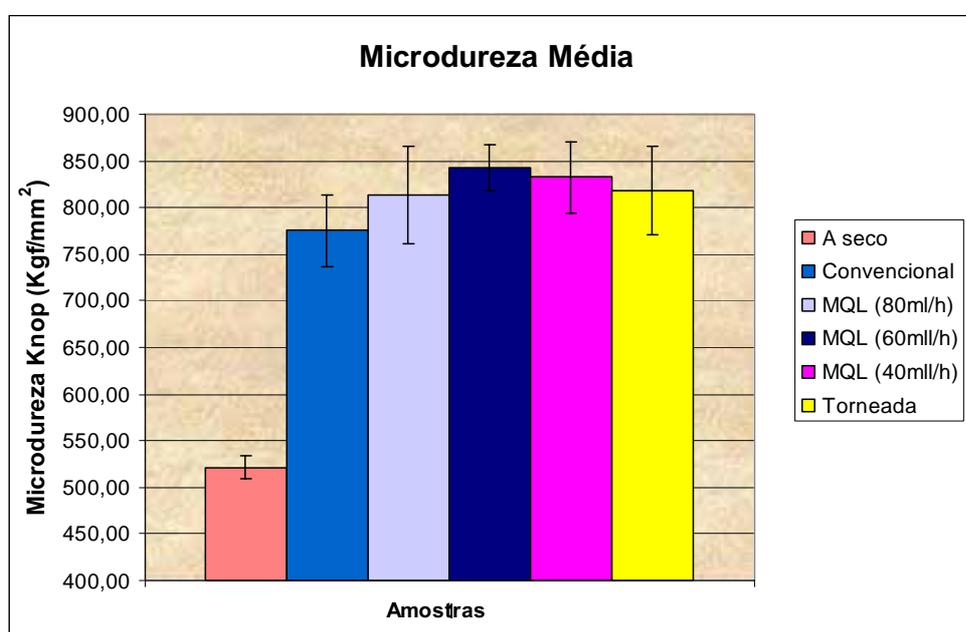


Figura 4.34– Microdureza Knoop média para condições de MQL, método convencional, ensaio a seco e peça somente torneada.

Através da microdureza Knoop média pode-se observar que existe uma tendência de que a perda de dureza seja diminuída para condições com maiores vazões de fluido de corte em condições MQL. Pode-se concluir que os sistemas MQL foram capazes de não comprometer a dureza da peça apesar da maior temperatura gerada por este processo.

Apesar de desvios padrões altos, a maior variação média de dureza em relação à peça original (torneada) foi encontrado para a vazão de 60ml/h, sendo que está apresentou 3,2% a mais de dureza que a peça torneada. Essa é a melhor condição em relação à variável de saída microdureza Knoop para a técnica MQL.

4.7.2.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na Microdureza (escala Knoop)

A Figura 4.35 apresenta os resultados de microdureza Knoop médias para as condições de MQL, MO e MC utilizadas. É apresentado também o valor de microdureza Knoop médio para ensaio de queima e peça somente torneada.

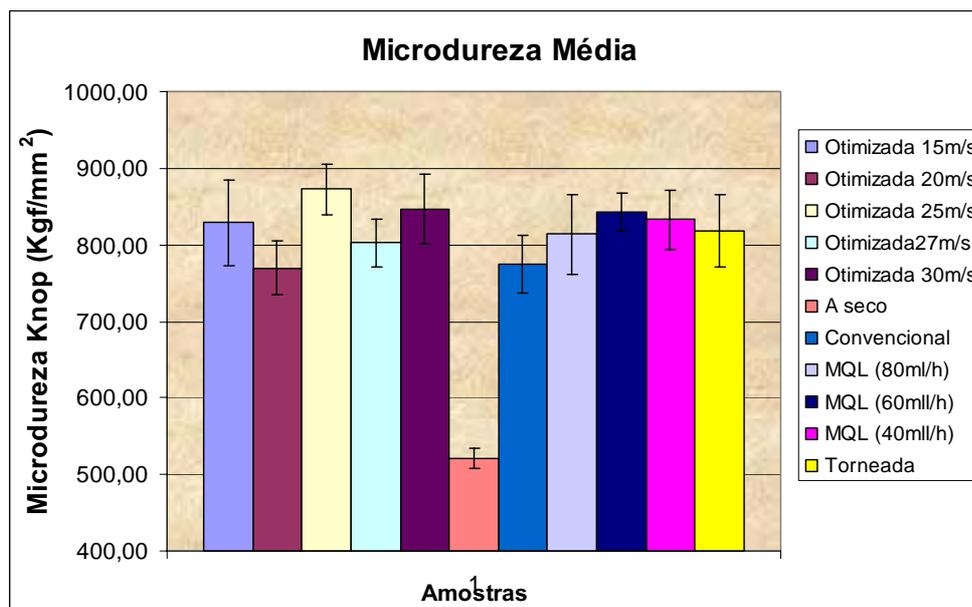


Figura 4.35- Microdureza Knoop médias para as condições de MQL, MO e MC, ensaio com queima e peça somente torneada.

A Figura 4.35 permite concluir que o método convencional, otimizado e MQL foram capazes de proporcionar um aquecimento e resfriamento adequados da peça durante os ensaios de maneira que as durezas obtidas para todas as condições envolvendo estes métodos ficaram muito próximas da dureza original da peça (peça torneada).

A melhor condição otimizada ($V_j=25\text{m/s}$) em relação a microdureza Knoop média foi 3,5% maior que a melhor condição MQL (vazão de 60ml/h).

Nos ensaios realizados a seco nota-se que a mesma apresenta menores valores de microdureza, o que é prejudicial à resistência ao desgaste e à corrosão. Isso ocorreu devido a retificação sem lubri-refrigeração produz maiores temperaturas na região e corte, onde grande parte desse calor é distribuído para a peça seguido de resfriamento lento possibilitando um revenimento mais efetivo (SILVA et al., 2002).

Os valores de microdureza estão associados principalmente à capacidade de dissipação de calor e a velocidade de resfriamento dos corpos de prova, pois a temperatura e modo de resfriamento são fatores determinantes na definição da estrutura granular obtida.

De acordo com Silva (2000), a operação de retificação em aços temperados e revenidos podem ocasionar um aumento significativo na microdureza superficial da peça. Isto ocorre devido à queima superficial, que é capaz de provocar um aumento da dureza superficial em função da retempera do material, a qual é consequência da re-austenitização do mesmo, proporcionando assim a formação da martensita não revenida que se caracteriza por elevada dureza e fragilidade.

Os três métodos utilizados (MO, MC, MQL) apresentaram desempenho satisfatório, apresentando aumentos ou no mínimo mantendo a dureza das peças retificadas.

Todos os valores encontrados para as técnicas MQL, MC e MO foram elevados estando muito próximo dos valores da peça original (torneada) e em alguns casos até superior (para velocidade do jato de 25 e 30m/s em condições otimizadas). Dessa forma, confirma-se a boa escolha das condições de usinagem que foram suaves onde as formas de lubri-refrigeração afetaram positivamente a integridade superficial ou pelo menos não trouxe danos ao componente usinado. Portanto, o calor gerado não foi suficiente para produzir alterações subsuperficiais significativas.

Segundo Weingaertner et al. (2001), o aumento da dureza ocorre pela formação de martensita quando a massa interna da peça e os meios externos resfriam a superfície. A martensita é formada quando a liga austenita-carbono é resfriada rapidamente a uma temperatura relativamente baixa. A martensita é uma estrutura de fase simples metaestável que resulta da transformação sem difusão da austenita. A obtenção da martensita ocorre quando a velocidade de resfriamento é suficientemente alta para evitar ou prevenir a difusão do carbono. O tempo de transformação da martensita é de aproximadamente 0,1 ms. No caso dos ensaios envolvendo certas condições MQL (60ml/h e 40ml/h) e otimizadas (25m/s e 30m/s) essa transformação provavelmente ocorreu de forma mais intensa.

Não foi notado um comportamento padrão para a microdureza em função da modificação das condições utilizadas em cada tipo de lubri-refrigeração. Conclui-se apenas que as formas de lubri-refrigeração utilizadas são capazes de manter a microdureza do componente.

As formas de lubri-refrigeração utilizados foram capazes de manter a dureza subsuperficial.

4.8. TENSÃO RESIDUAL

Neste item são apresentados os valores de tensão residual mediante a variação da forma de aplicação do fluido de corte do fluido.

4.8.1. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na tensão residual.

Na Figura 4.36 são apresentados os valores de tensão residual obtidos ao final de cada ensaio para cada uma das condições de usinagem utilizadas nesta pesquisa, ilustrando a possível influência da quantidade de fluido lubrificante utilizando o sistema de mínima quantidade de lubrificação (MQL).

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 podem gerar tensões de tração e compressão. As dilatações térmicas na retificação são proporcionais às temperaturas geradas no processo, onde a camadas externas são expostas a maiores temperaturas que as camadas internas, dilatando-se mais que as camadas internas gerando tensões de compressão.

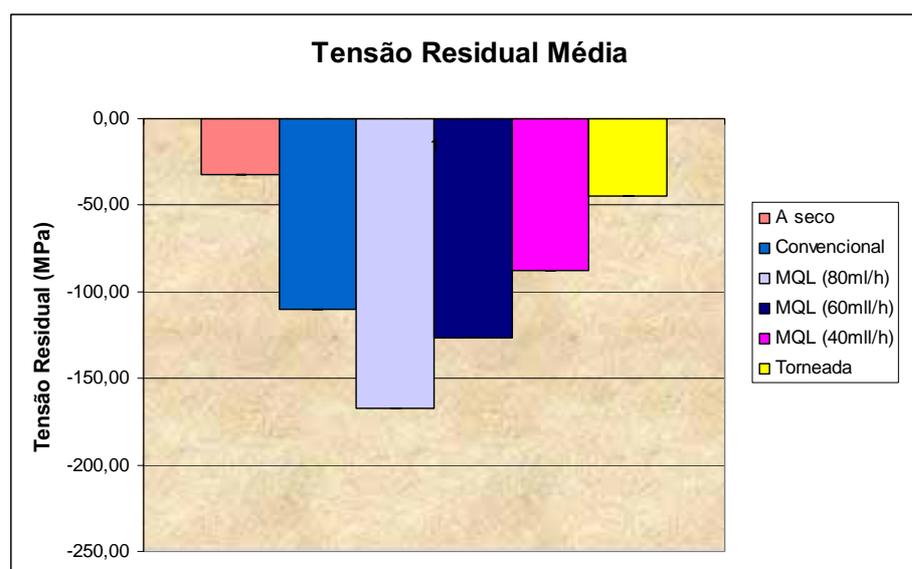


Figura 4.36– Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na tensão residual

Através da análise do gráfico da Figura 4.36 nota-se que a técnica da MQL apresentou resultados superiores com relação à condição de lubri-refrigeração convencional, 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. Quanto maiores as tensões melhores são as propriedades mecânicas do material. Já as tensões residuais de tração prejudicam a resistência mecânica a corrosão e ao desgaste.

A aplicação MQL com vazão de fluido de corte de 40ml/h apresentou tensões residuais de compressão 49% menores que para a vazão de 80ml/h (MQL), 33,6 % menor que para a vazão de 80ml/h (MQL) e 21,3 % menor que para a condição convencional, demonstrando que a maior vazão de fluido de corte usada no MQL proporciona melhores (maiores) tensões residuais.

Analisando-se a Figuras 4.36 nota-se que todas as tensões obtidas neste processo de retificação em questão foram benéficas para as peças usinadas, pois foram todas tensões de compressão.

Também pode ser verificado que as maiores tensões de compressão, foram obtidas para a aplicação com 80ml/h de fluido.

4.8.2. Influência da velocidade de aplicação do fluido no sistema otimizado na tensão residual.

Na Figura 4.37 são apresentados os valores de tensão residual obtidos ao final de cada ensaio para cada uma das condições otimizadas.

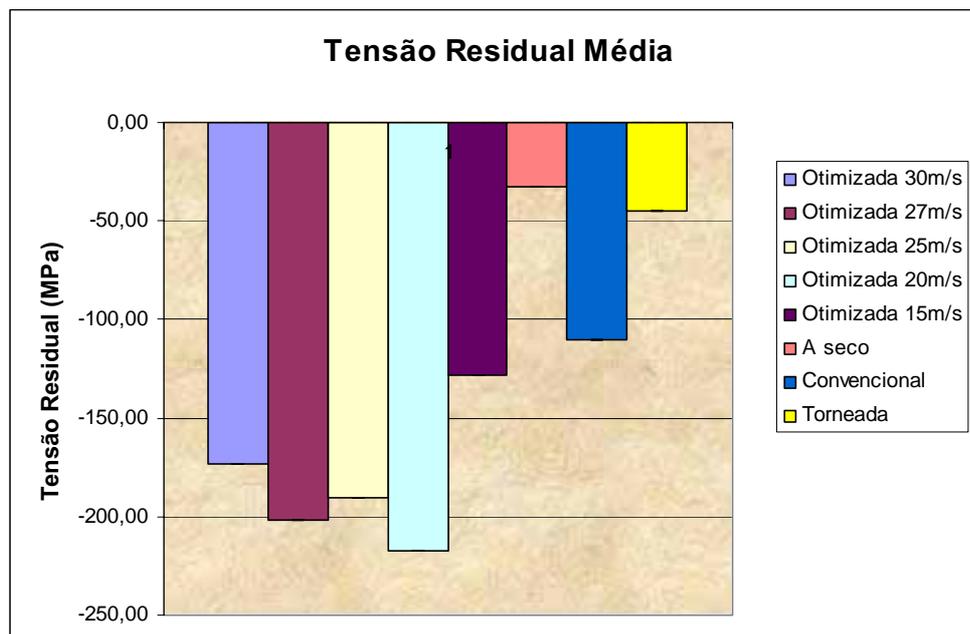


Figura 4.37– Influência da velocidade de aplicação do fluido no sistema otimizado na tensão residual.

A predisposição dos rebolos de CBN a produzirem tensões mais favoráveis ao processo, está diretamente ligada às propriedades dos grãos abrasivos deste material. A maior dureza de seus grãos permite um menor desgaste, menores forças de retificação e uma menor geração de calor. A maior condutibilidade térmica dos grãos de CBN permite uma menor partição da energia gerada para a peça assegurando uma melhor integridade superficial do componente usinado (KOHLI et al., 1995).

Observa-se ainda que a lubri-refrigeração otimizada apresentou, de uma forma geral, tensões de compressão maiores que às geradas pela lubri-refrigeração convencional e MQL.

4.8.3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na tensão residual.

A Figura 4.38 apresenta os resultados de tensão residual médias para as condições de MQL, MO e MC utilizadas. É apresentado também o valor de tensão residual médio para ensaio de queima e peça somente torneada.

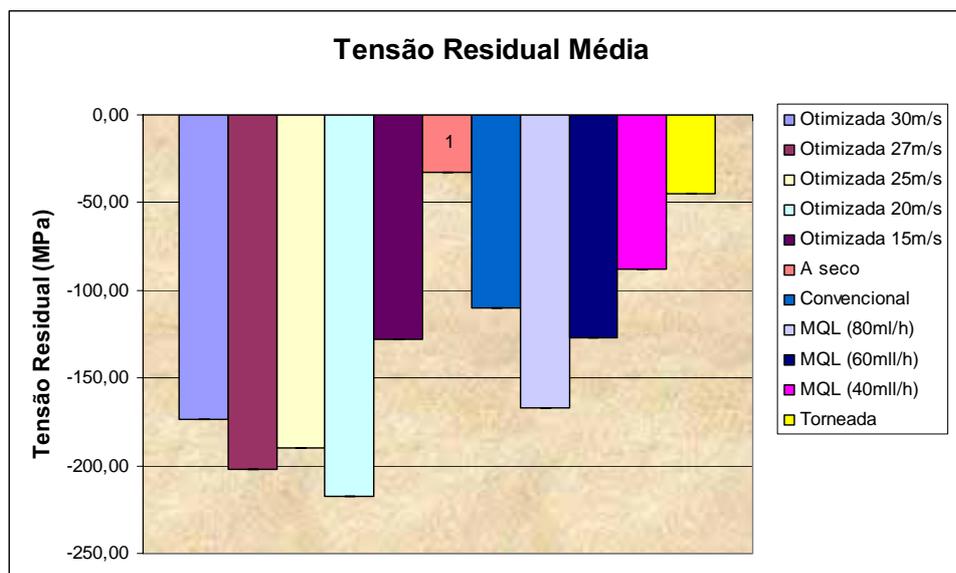


Figura 4.38– Análise das formas de aplicação de fluido de corte na tensão residual.

Na Figura 4.38 apresenta-se a influência da forma de aplicação dos fluidos de corte nos valores das tensões residuais obtidos para as diferentes condições de aplicação de fluido utilizadas.

Analisando-se a Figura 4.38 tem-se que as tensões verificadas foram compressivas. Fato comprovado por Brinksmeier et al. (1982) quando usando rebolos de CBN. A maior condutividade térmica do CBN possibilita que uma menor partição da temperatura dirija-se a peça diminuindo os efeitos térmicos.

4.9. ANÁLISE MICROESTRUTURAL POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A integridade superficial de uma peça é um fator de extrema importância, no entanto danos causados à superfície de um material podem afetá-la significativamente, causando degradação de propriedades relativas à resistência ao desgaste, à corrosão, nucleação e propagação de trincas e aceleração do processo de fadiga da peça. A integridade superficial de uma peça é afetada principalmente pela temperatura oriunda do processo de retificação, podendo causar danos térmicos na peça (ALVES, 2005).

A ocorrência de danos à integridade superficial de uma peça pode levar à aceleração do processo de fadiga da peça, alterar a resistência à abrasão e à corrosão, ou ainda provocar o surgimento e crescimento de trincas. Entretanto, a elevação da temperatura na região de

contato entre rebolo e a peça pode causar danos térmicos, dependendo das temperaturas envolvidas e da taxa de resfriamento imposta à peça pelo fluido de corte (SILVA et al., 2002).

Para evitar a ocorrência de danos térmicos é necessário uma correta escolha do par fluido-ferramenta, utilizando a menor quantidade de fluido necessária através de variadas técnicas possíveis capazes de não provocar alterações estruturais à qualidade final da peça.

Neste item são apresentadas microscopias realizadas nas peças retificadas com o rebolo de CBN, mediante lubri-refrigeração otimizada, MQL e convencional. São apresentadas ainda microscopias de um corpo de prova torneado e temperado somente e de corpos de prova submetidos a ensaio de queima (sem lubrificação).

Neste Capítulo optou-se por apresentar primeiramente como são as condições superficiais de uma peça sem qualquer dano. Este foi o objetivo de se realizar microscopias em uma peça somente torneada e temperada.

A seguir apresenta-se microscopia do ensaio de queima onde não se utilizou fluido de corte. Com estas microscopias é possível observar os danos que uma peça retificada pode vir a sofrer caso as condições não sejam adequadas.

Finalmente, são apresentadas microscopias para as condições de lubri-refrigeração convencional, otimizada e MQL. Dessa forma podem-se realizar comparações qualitativas das peças produzidas com os padrões de peça ideal (peça somente torneada) e peça com danos (ensaio de queima).

Todas as microscopias apresentadas neste item foram produzidas com um aumento de 2000 vezes.

4.9.1. Características de uma peça onde a integridade superficial esta mantida

A Figura 4.39 apresenta a microscopia de um corpo de prova somente torneado e temperado.

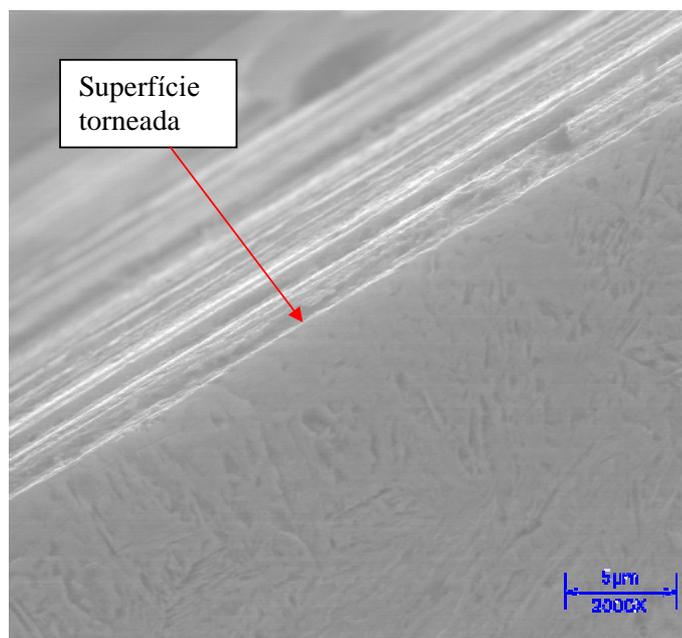


Figura 4.39– Microscopia de um corpo de prova somente torneado e temperado (ampliação de 2.000 vezes).

Na Figura 4.39 pode-se observar o não aparecimento de trincas. Também não há áreas onde tenham ocorrido fases diferentes (revenimento ou queima). Esta microscopia apresenta como deve estar a superfície da peça após ocorrer a uma retificação evitando aparecimentos destes danos.

A análise da Figura 4.39 permite concluir que o aço ABNT 4340, temperado e revenido, apresenta estrutura martensítica cuja formação é caracterizada por mecanismos complexos de difusão de carbono, pela temperatura, pelo tempo de aquecimento e das velocidades de resfriamento impostas pelo fluido de corte.

A microscopia apresentada na Figura 4.39 não apresenta alterações subsuperficiais. Provavelmente a quantidade de calor e de deformação plástica que foi para a peça durante a o torneamento, têmpera e revenimento não foram suficientes para produzir alterações significativas na microestrutura do material.

4.9.2. Influência da falta de lubrificante na integridade superficial através de MEV.

As Figuras 4.40 e 4.41 apresentam duas microscopias obtidas com o ensaio de queima onde não se utilizou lubrificação. O objetivo de se realizar a microscopia desses corpos de

prova é o de apresentar os danos que a falta de lubrificação pode ocasionar no processo de retificação.

Na Figura 4.40 é possível notar o arrancamento de material da superfície retificada. Material este que provavelmente aderiu ao rebolo através de microsoldas devido à falta de lubrificação e refrigeração ou aderiu gerando o entupimento dos poros do rebolo. As altas temperaturas geradas neste ensaio de queima proporcionaram na peça um revenimento, comprovado na análise de microdureza, que pode ser observado através da mudança de fase visível na microscopia. A zona de revenimento atingiu aproximadamente $20\ \mu\text{m}$.

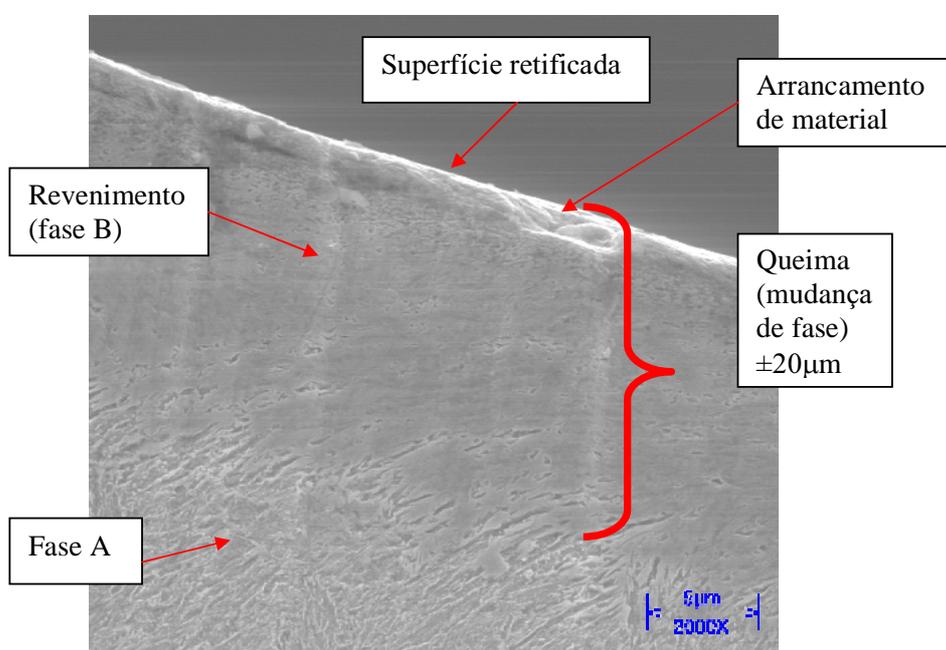


Figura 4.40– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação – (Ensaio 46-queima) (ampliação de 2.000 vezes).

Para o ensaio a seco foram encontrados vários danos subsuperficiais. Provavelmente a quantidade de calor e de deformação plástica que foi para a peça durante a retificação produziram alterações significativas na microestrutura do material.

Em uma segunda microscopia realizada com o corpo de prova submetido ao ensaio de queima (Figura 4.41) é possível notar a zona de queima e revenimento.

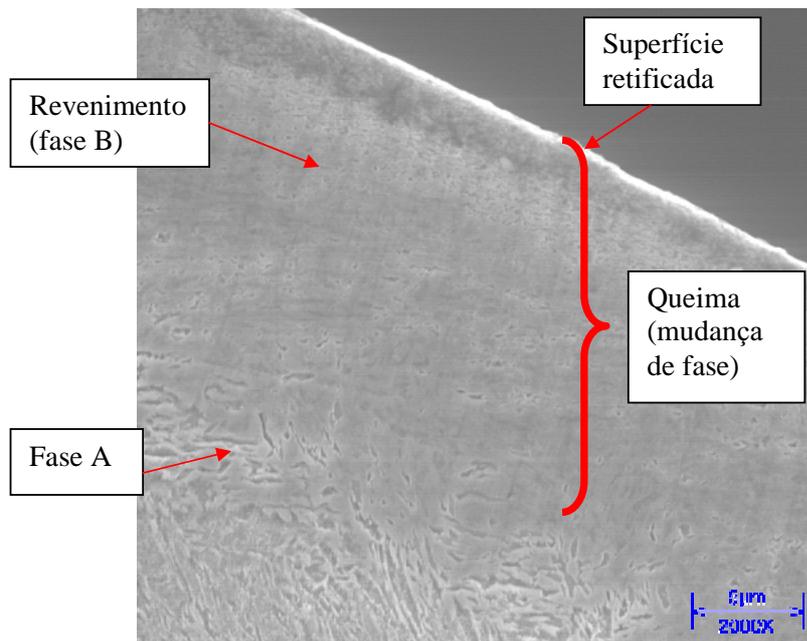


Figura 4.41– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação – (Ensaio 46-queima) (ampliação de 2.000 vezes).

4.9.3. Influência da aplicação convencional de fluido de corte na integridade superficial através de MEV

A Figura 4.42 apresenta uma microscopia obtidas com o ensaio submetido à lubri-refrigeração convencional.

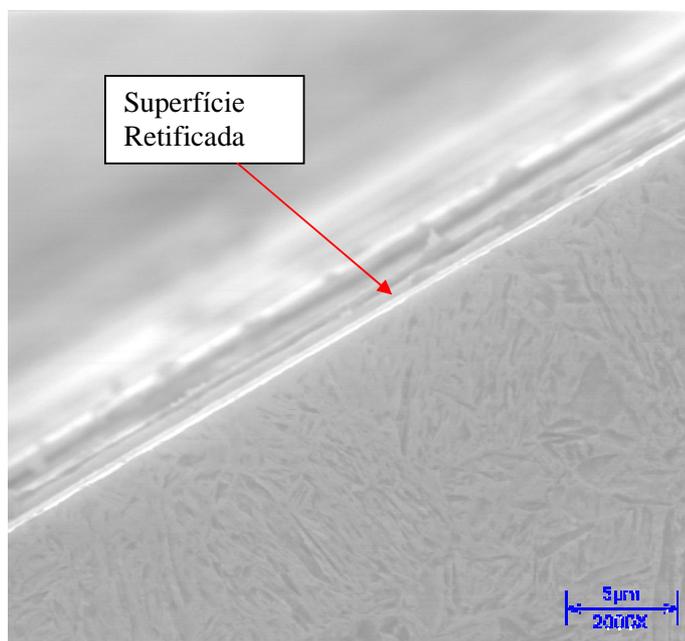


Figura 4.42- Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com lubri-refrigeração convencional – (Ensaio 45) (ampliação de 2.000 vezes).

Através da microscopia apresentada na Figura 4.42 pode-se observar que a lubri-refrigeração convencional foi capaz de lubrificar e refrigerar a peça de forma eficiente não permitindo a ocorrência de danos na peça produzida.

Além disso, o tempo de contato dos grãos abrasivos e o tempo de resfriamento são muito pequenos, não favorecendo as diferenças significativas na subsuperfície.

Klocke et al. (2000) encontrou resultados semelhantes usando refrigeração convencional usando bocal tipo sapata com vazão de fluido de corte de 24l/m.

4.9.4. Influência da velocidade de aplicação do fluido de corte utilizando lubri-refrigeração otimizada na integridade superficial através de MEV

As Figuras 4.43, 4.44, 4.45, 4.46, 4.47 apresentam microscopias obtidas para as condições de lubri-refrigeração otimizada com velocidades de aplicação do fluido de corte de 30m/s, 27m/s, 25m/s, 20m/s e 15m/s respectivamente.

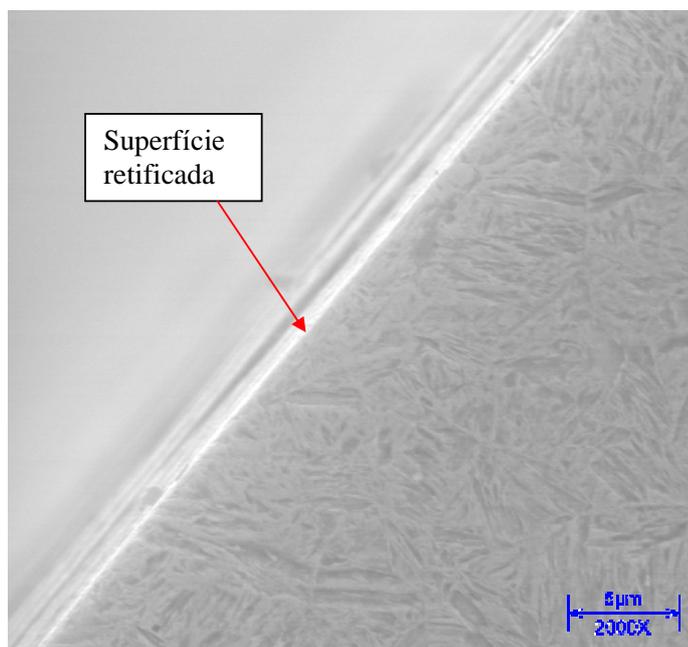


Figura 4.43– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com lubri-refrigeração otimizada com velocidade de aplicação do fluido de 30m/s (Ensaio 18) (ampliação de 2.000 vezes).

Segundo Malkin et al. (2002), a energia gasta na retificação é convertida em calor na zona de retificação, o que produz altas temperaturas e possíveis danos térmicos na peça. Na retificação de aços temperados, podem ocorrer vários danos térmicos, incluindo têmpera e reendurecimento pela formação de martensita não revenida frágil. Pode ocorrer ainda a reaustenização se as temperaturas presentes foram altas suficientes. Estes danos podem ser evitados se o processo de retificação for executado de forma que a temperatura máxima da zona de retificação seja mantida abaixo do valor mínimo para reaustenização.

A microscopia apresentada na Figura 4.43 e as demais seguintes obtidas em ensaios em condições otimizadas não se percebem sinais de alterações subsuperficiais significativas na microestrutura com o emprego da técnica otimizada.

A eficiência da técnica otimizada pôde ser confirmada devido à boa lubrificação e refrigeração proporcionada que garantiram a integridade superficial da peça.

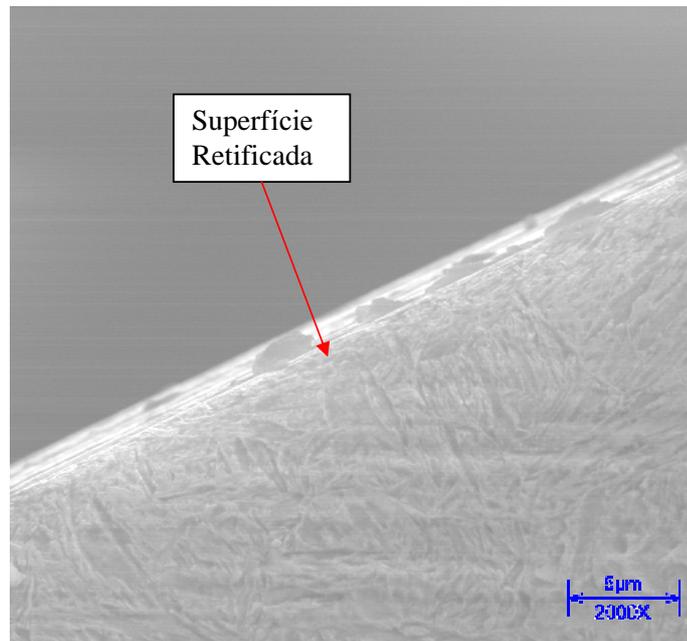


Figura 4.44– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com lubri-refrigeração otimizada com velocidade de aplicação do fluido de 27m/s (Ensaio 23) (ampliação de 2.000 vezes).

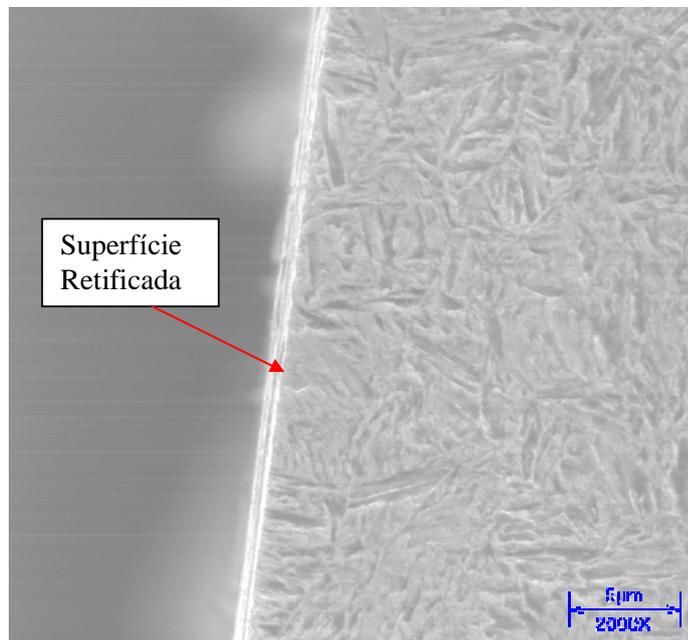


Figura 4.45– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com lubri-refrigeração otimizada com velocidade de aplicação do fluido de 25m/s (Ensaio 27) (ampliação de 2.000 vezes).

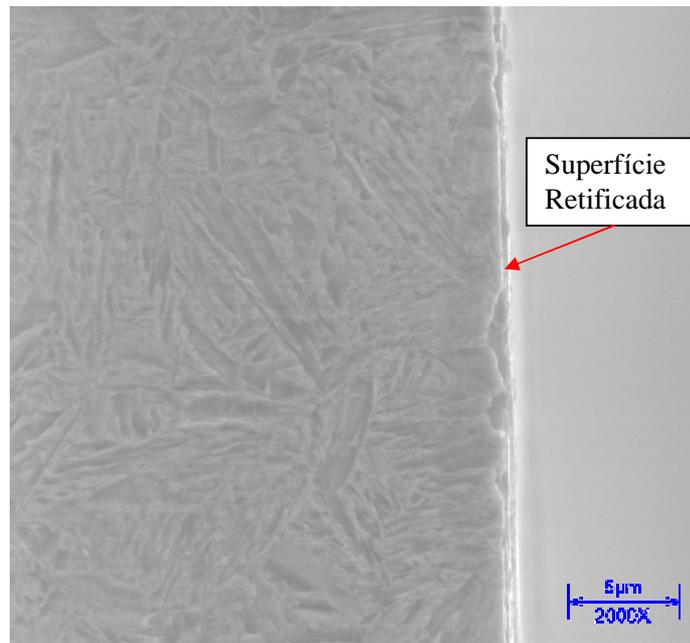


Figura 4.46– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com lubri-refrigeração otimizada com velocidade de aplicação do fluido de 20m/s (Ensaio 32) (ampliação de 2.000 vezes).

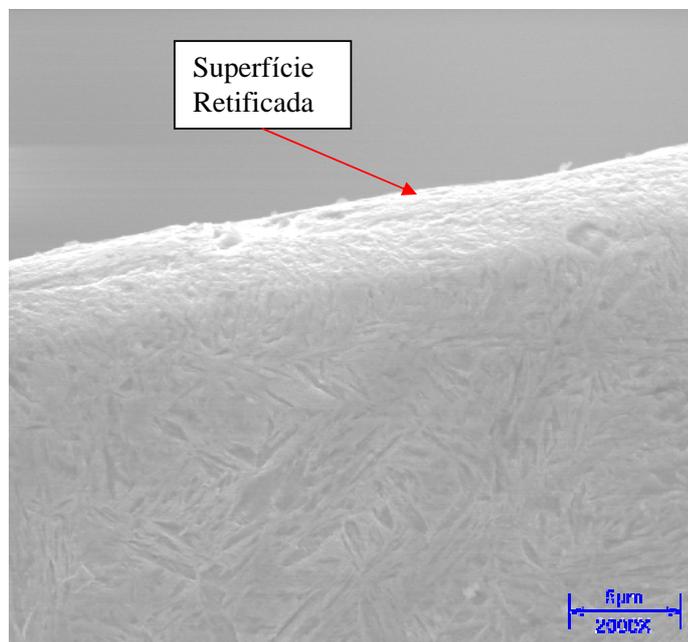


Figura 4.47– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com lubri-refrigeração otimizada com velocidade de aplicação do fluido de 15m/s (Ensaio 38) (ampliação de 2.000 vezes).

Os aspectos das microscopias para a técnica otimizada apresentaram diferenças significativas quando comparadas com os ensaios a seco, não apresentando danos térmicos como os apresentados para os ensaios realizados à seco. Isso se deve provavelmente a escolha das condições de retificação que foram suaves resultando na manutenção da integridade superficial da peça proporcionando maiores resistências à fadiga, corrosão e abrasão.

4.9.5. Influência da quantidade de lubrificante na aplicação do fluido utilizando MQL na integridade superficial através de MEV.

As Figuras 4.48, 4.49, 4.50 e 4.51 apresentam microscopias obtidas para as MQL com vazões de fluido de corte de 80ml/h, 60ml/s, 40ml/h.

As microscopias apresentadas na Figura 4.48 e 4.49 trazem microscopias realizadas para condições MQL com 80ml/h e 60ml/h respectivamente. Nestas condições não se percebem sinais de alterações subsuperficiais significativas na microestrutura com o emprego da técnica MQL

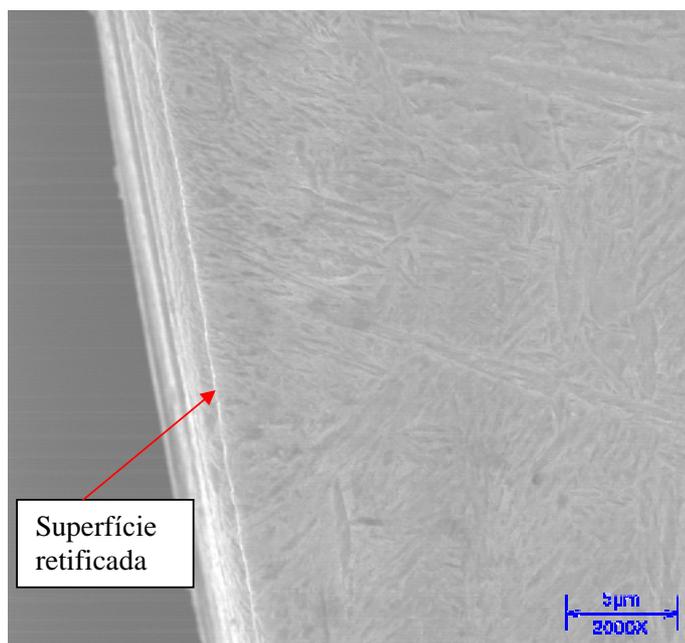


Figura 4.48– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL com vazão de fluido de corte de 80ml/h (Ensaio 4) (ampliação de 2.000 vezes).

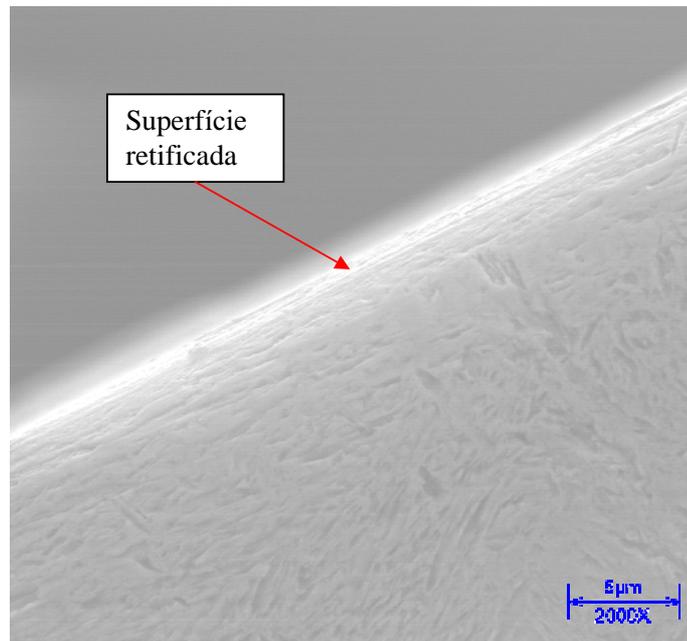


Figura 4.49– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL com vazão de fluido de corte de 60ml/h (Ensaio 9) (ampliação de 2.000 vezes).

As microscopias apresentadas na Figura 4.50 e 4.51 trazem microscopias realizadas para a condição MQL com 40ml/h. Nestas condições foi possível perceber sinais de alterações subsuperficiais significativas na microestrutura como trincas e queima superficial.

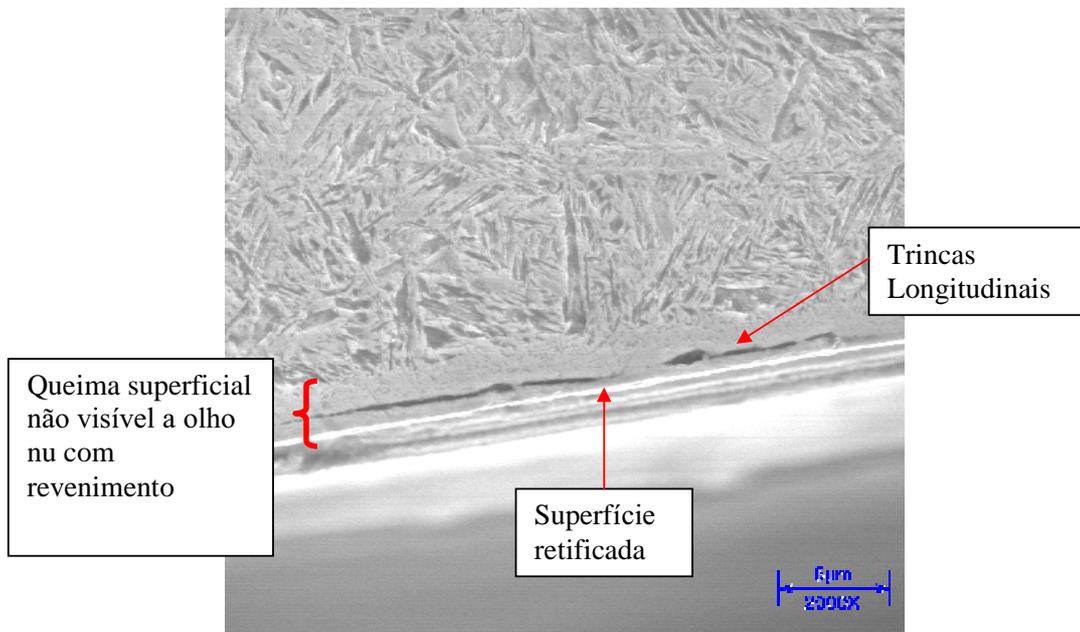


Figura 4.50– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL com vazão de fluido de corte de 40ml/h (Ensaio 14) (ampliação de 2.000 vezes).

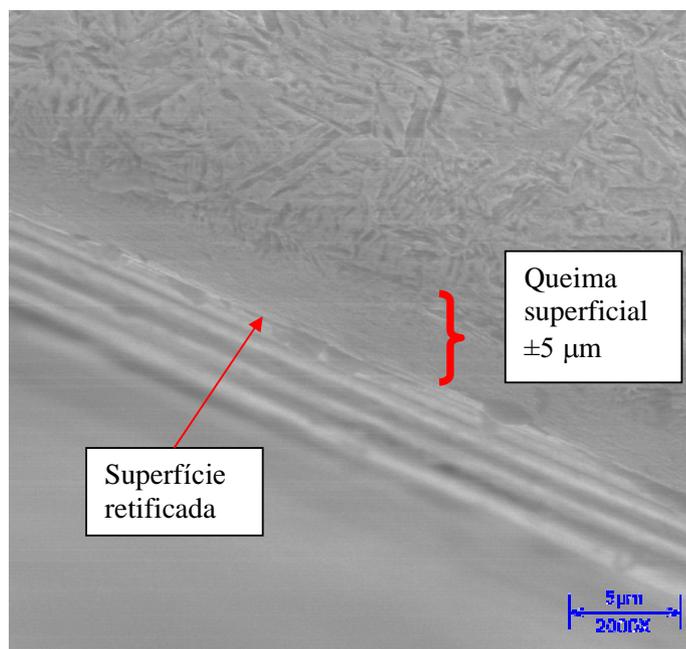


Figura 4.51– Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL com vazão de fluido de corte de 40ml/h (Ensaio 15) (ampliação de 2.000 vezes).

Analisando-se as microscopias percebe-se que houve mudanças significativas nas microscopias e o aparecimento de trincas em algumas condições de lubri-refrigeração.

Pode-se afirmar que ocorreram diferenças quando da variação da forma de aplicação do fluido de corte para a condição MQL com vazão de fluido de corte de 40ml/h.

Analisando-se as microestruturas, verifica-se que o material do corpo de prova, apresenta uma estrutura martensítica. A formação deste tipo de microestrutura esta associada a temperatura, velocidade de aquecimento e resfriamento (gradientes térmicos), influenciadas pelo tipo e forma de aplicação do fluido de corte.

Tal análise pode ser reforçada visualizando-se a Figura 4.39, a qual revela a microestrutura para o corpo de prova após a operação de torneamento, seguido de tratamento térmico (têmpera e revenimento) não submetido à operação de retificação. Através da análise da microestrutura pode-se afirmar que as diversas condições testadas para as técnicas otimizada e convencional de lubri-refrigeração, demonstraram resultados satisfatórios, ou seja, sem alterações significativas da microestrutura após a retificação, não apresentando possíveis danos à superfície da peça, melhorando assim propriedades da peça, como resistência à corrosão e a abrasão e maiores resistências à fadiga. Exceção somente para a

situação onde a vazão de fluido de corte foi de 40ml/h na técnica MQL onde houve a presença de trincas e revenimento, no entanto sem queima visual.

A queima ocorrida no ensaio MQL com vazão de fluido de corte de 40ml/h não foi detectada na análise de microdureza. Isso deve-se ao fato de que para a obtenção dos corpos de prova para a realização dos ensaios de microdureza foi realizado um lixamento de aproximadamente 4mm que removeu a camada queimada. Com isso nota-se a importância de conciliar as duas técnicas (microdureza e MEV) para obter resultados mais conclusivos.

5. CONCLUSÕES

Analisando os dados obtidos nos ensaios realizados com o aço ABNT 4340 temperado e revenido, pode-se observar o comportamento da retificação cilíndrica de mergulho utilizando-se rebolo superabrasivo de CBN com baixa concentração de material abrasivo com ligante vitrificado, quando da aplicação da lubri-refrigeração convencional, técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) e da aplicação otimizada.

- A análise geral dos resultados indica que a técnica da MQL demonstrou ser viável como uma alternativa para a substituição da lubri-refrigeração convencional dependendo do grau de precisão desejado ao componente, proporcionando ganhos ecológicos e econômicos;
- O Método MQL só deve ser empregado em condições que se possa ter precisão do ajuste e instalação do bocal, pois qualquer desvio nestas condições poderá ocorrer o fracasso do processo. Deve-se, portanto, pensar em suportes rígidos suficientemente capaz de garantir a perfeita localização do bocal e evitar que este fique susceptível a agentes externos como o empuxo.
- Através dos resultados da força tangencial de corte, energia específica de retificação e emissão acústica conclui-se que a utilização do sistema MQL com velocidade de saída do ar comprimido de 30 m/s, rebolo de CBN com 15% de material abrasivo, velocidade de corte de 30m/s, deve ser utilizada para uma espessura equivalente de corte (h_{eq}) máxima de aproximadamente 0,060 μ m. Como a espessura equivalente depende do diâmetro da peça, da velocidade de mergulho e da velocidade de corte, estes parâmetros devem ser ajustados de forma que o rebolo tenha capacidade de corte (menor remoção por grão abrasivo) e o sistema MQL seja capaz de remover os cavacos dos poros do rebolo.
- A técnica otimizada demonstra ser fundamental para se obter peças mais precisas comparada às outras técnicas utilizadas, sendo desta forma uma opção de obter peças com maior qualidade sem fazer mudanças de rebolos, fluidos de corte, condições de dressagem e corte.
- Maiores vazões e maiores velocidades de aplicação de fluido de corte proporcionaram melhores resultados para o material usinado como menores rugosidades e menores desvios de circularidade;
- Nota-se a possibilidade de utilização de rebolos de CBN com menores quantidades de abrasivos associados a formas mais eficientes de aplicação de fluido de corte, sem

prejudicar as propriedades dos componentes usinados, contribuindo para a redução de custos do processo de retificação.

- Fluidos de corte menos agressivos ao meio ambiente e à saúde humana, como os fluidos utilizados nesta Tese que são de origem vegetal, mostraram-se capazes de serem utilizados em processos de retificação sem prejudicar a qualidade das peças produzidas contribuindo para uma diminuição dos prejuízos à saúde e à natureza.
- Em todas as formas e condições de lubri-refrigeração obtiveram-se tensões de compressão que são tensões benéficas ao componente;
- Analisando a integridade superficial das peças retificadas com a técnica da MQL, com relação à microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microdureza, verificou-se que não ocorreram alterações das propriedades do material para todas as condições otimizadas e condição convencional, devido à eficiência da lubrificação alcançada;
- Para a técnica MQL, quando utilizando vazões de 80ml/h e 60ml/h não foram percebidos defeitos térmicos. Para a condição MQL com vazão de 40ml/h notou-se o aparecimento de trincas e revenimento devido principalmente à menor lubrificação proporcionada aumentando a geração de calor devido ao atrito grão e peça.
- Todas as variáveis analisadas sofreram redução significativa com a aplicação da técnica otimizada, devido à boa lubri-refrigeração proporcionada pela técnica e devido à eficiência proporcionada pelo modelo de bocal inovador utilizado;
- Possibilidade de utilização da lubri-refrigeração otimizada para situações mais severas utilizando espessuras equivalente de corte maiores que as utilizadas nesta pesquisa;
- As condições utilizadas para a técnica de 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.
- Para as demais velocidades de aplicação do fluido de corte no processo de retificação que se transcorreu mediante a uma lubri-refrigeração otimizada, notou-se uma tendência em se melhorar os resultados finais obtidos com o aumento da quantidade de fluido no processo;
- Apesar de ter sido usado um rebolo de CBN duro de estrutura aberta e com baixa concentração de CBN (15% no volume) e de granulometria fina (entre 100 e 120 mesh), os resultados para a técnica MQL foram satisfatórios já que resultados encontrados estão dentro de limites aceitáveis para a retificação. Experimentos

realizados por Silva et al. (2000) usando lubrificação MQL na retificação do aço ABNT 4340 temperado com rebolo duro com concentração de 25% de CBN com granulometria fina de estrutura fechada apresentaram resultados melhores que para a lubrificação convencional. Fato este devido ao maior número de arestas cortantes devido a maior concentração de abrasivos de CBN presente no rebolo diminuindo os esforços que cada grão abrasivo sofre durante a retificação. A possível diminuição da concentração de grãos abrasivos de CBN nos rebolos significa menores custos do processo.

- Ficou demonstrado que usando velocidades do jato de corte próximas da velocidade de corte obtém-se os melhores resultados, pois nestas condições quebra-se a barreira aerodinâmica ao redor do rebolo e favorece a entrada de fluido além de proporcionar um melhor espulsão do cavaco diminuindo os efeitos deste sobre a peça. Ressalta-se a necessidade de estudos mais aprofundados para maiores velocidades de jato em relação a velocidade de corte.

- Conclui-se a possibilidade de utilização da técnica MQL usando rebolo com baixa concentração de abrasivo (15%) em situações onde a especificação da rugosidade e circularidade não são tão apertadas como na usinagem de assentos de rolamentos em eixos, eixos e furos para engrenagens entre outras que representam grande parte das aplicações de retificação no meio industrial.

Em fim, Pode-se afirmar dentro dos objetivos previstos, que este trabalho apresenta importantes contribuições no sentido de entender e compreender os efeitos das diferentes formas de aplicação e fluido de corte, da utilização de rebolos de CBN mais baratos com menor concentração de material abrasivo e da utilização de fluidos de corte menos nocivos..

Com os resultados apresentados, o meio científico e industrial será favorecido usando os resultados obtidos de forma a utilizarem estas três possibilidades funcionais de lubri-refrigeração dependendo dos parâmetros de qualidade necessários aos componentes a serem fabricados, proporcionando uma maior economia quanto ao consumo e ao descarte dos fluidos de corte e reduzindo os possíveis problemas ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores além de possibilitar uma economia inicial do processo.

No entanto faz-se necessário a constante investigação sobre as três formas de aplicação de fluido de corte com o objetivo de obter um melhor conhecimento sobre as técnicas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de prosseguir no estudo das diferentes formas de aplicação de fluido de corte e suas conseqüências para as peças produzidas, várias outras análises devem ser realizadas. Como sugestão para o aprimoramento deste tema pode-se citar algumas análises pertinentes que podem vir a serem realizadas:

- Verificar o comportamento das três diferentes formas de aplicação em outros materiais como cerâmicas avançadas e ligas de titânio, etc.;
- Verificar o comportamento das três diferentes formas de aplicação em outros tipos de rebolos com concentrações de abrasivos e porosidades diferentes das usadas nesta pesquisa;
- Verificar o comportamento das três diferentes formas de aplicação em outros tipos de fluidos de corte (soluções, emulsões, etc.);
- Verificar o comportamento das três diferentes formas de aplicação para maiores velocidades de corte, para diferentes tipos de rebolos, em retificadoras com alto grau de rigidez que permitam maiores velocidades que as usadas nesta pesquisa;
- Analisar a influência da lubrificação otimizada para maiores velocidades de aplicação de fluido de corte dos que as utilizadas nesta pesquisa;
- Analisar a influência da lubrificação otimizada para menores velocidades de aplicação dos que as utilizadas nesta pesquisa;
- Estudar a lubrificação otimizada para maiores espessuras equivalentes de corte que a espessura utilizada nesta tese.
- Analisar a influência da aplicação MQL para maiores vazões e diferentes velocidades de ar comprimido;
- Analisar a influência da aplicação MQL para vazões intermediárias às usadas nesta tese buscando observar se existe uma vazão ideal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6405/1988 – **Rugosidades de superfícies**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988, p. 1-9.

ABNT NBR ISO 10012-1, **Requisitos de Garantia da Qualidade para Equipamento de Medição**. 1993.

AGOSTINHO, O. L., RODRIGUES, A. C. S., LIRANI, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios Análise de Dimensões**”. 5ª.ed. Edgard Blücher Ltda, 1997.

AGOSTINHO, O. L., RODRIGUES, A. C. S., LIRANI, J. **Princípios de Engenharia de fabricação Mecânica-Processos de Fabricação**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1976.

AGOSTINHO, O. L., RODRIGUES, A. C. S., LIRANI, J. **Princípios de Engenharia de fabricação Mecânica-Processos de Fabricação-Volume 2**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

AGUIAR, P. R. **Monitoramento da queima superficial em processo de usinagem por retificação usando a potência elétrica do motor de acionamento e emissão acústica**. Tese de Doutorado - USP, São Paulo, SP, Brasil, 1997.

ALVES, M. C. S. **Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada**, Dissertação de Mestrado – UNESP, Bauru, SP, Brasil, 2005.

ASM International Handbook Committee, **Metals Handbook, 6a. edição**, Cap. 27, Maio de 1991, p. 14-20.

ASME, American Society of Mechanical Engineers. ANSI/ASME Y14.5M, **Dimensioning and Tolerancing**. New York, 1982.

ATTANASIO A., GELFI M., GIARDINI C., REMINO C., **Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear**, Wear 260 (2006) 333–338.

BACKER, W. R., MARSHALL, E.R., SHAW, M. C. **The Size Effect in Metal Cutting**. Trans. Asme, 74, 1952, p. 61.

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

BENNETT, B. **Cutting Fluids and Superabrasives Applications**. Cincinnati Milacron, AES Magazine, 1993, p.12.

BIANCHI, C. E., SILVA, E. J., LOVATO, M. C., FERNANDES, O. C., VALARELLI, I. D. **Características e tendências do processo de abrasão**. Revista Máquinas & Metais, Aranda Editora, Ano XXXV, nº 399, Abril, 1999b, p. 238-249.

BIANCHI, C. E., SILVA, E. J., SILVA JUNIOR, C. E., SOUZA, G. F., FORTULAN, C. A., FERNANDES, O. C., VALARELLI, I. D., AGUIAR, P. R., **Grinding of brittle and ductile steels: How to act on the grinding parameters in order to get the best results?** Abrasives Magazine, August/September, 1999a, p. 22-27.

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

BIANCHI, E. C., CATAI, E. C., AGUIAR, P. R. **Formas otimizadas para a aplicação de fluidos de corte na retificação dos metais.** In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais - CBECIMAT, Natal, RN, Brasil, 2002, 6p.

BORGES, J.N. **Preparação de amostras para análise microestrutural.** Disponível em: <<http://www.materiais.ufsc.br/lcm>. > Acesso em: 12 maio 2006.

BRAGA, D. U., DINIZ, A. E., COPPINI, N. L., MIRANDA, G. W. **Furação de liga de alumínio silício utilizando lubrificação por névoa.** Revista Máquinas e Metais, Aranda Editora, Ano XXXVI, nº 413, Junho, 2000, p. 104-115.

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, 1986, p. 173-189.

BRINKSMEIER, E., HEINZEL, C., WITTMANN, M., SCHMID, U., DREYER, M., RATH, H. J. **Como a aplicação do fluido refrigerante pode ser melhorada na retificação.** Revista Máquinas e Metais, Outubro, 2001, p. 34-41.

BRINKSMEIER, E.; CAMMETT, J. T.; KÖNIG, W.; LESKOVAR, P.; PETERS, J.; TÖNSHOFF, H. K. **Residual stresses – measurement and causes in machining processes.** Annals of the CIRP, vol. 31, 1982, p. 491-510.

BYRNE, G., DORNFEL, D., INASAKI, I., KETTLER, G., KONIG, W., TETI, R., **Tool condition monitoring (TCM), the status of research and industrial application.** Annals of the CIRP, vol. 44/1, 1995, p. 49-54

BYRNE, G., **Usinagem em ambiente limpo: não se trata apenas de uma questão de higiene.** Revista Máquinas e Metais, nº 363, Abril, 1996, p. 66-80.

CAMPBELL, J. D. **“Optimized Coolant Application”** Technical Paper, MR95-211, Society of Manufacturing Engineers – 1995.

CAMPBELL, J. D., **Optimized Coolant Application.** In: 1st International Machining and Grinding Conference, Technical Paper, MR95-211, Society of Manufacturing Engineers, 12-14 September, Dearborn, Michigan, 1995, p. 895-904.

CARIUS, A. C., **Desenvolvimento de produtos e do mercado de CBN na Europa e na América.** Revista Máquinas e Metais, nº 403, 1998, p. 86-103.

CARPINETTI, L. C. R. **“Planejamento e análise de experimentos.”** EESC -USP, São Carlos - SP, p.205, 2000.,

CARPINETTI, L. C. R., GONÇALVES FILHO, E. V., PORTO, A. J. V., JASINEVIVIUS, C. R. G., **Rugosidade – Conceitos e princípios de medição.** Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

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

- COSTA NETO, P. L. O., **Estatística**. Ed. Edgard Blucher Ltda, 1977, São Paulo.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 2ª Edição, 2000, p.225-244.
- DORNFELD, D. A., LEE, Y., CHANG, A, **Monitoring of Ultraprecision Machining Processes**, Int J Adv Manuf Technol (2003) 21:571–578.
- DÖRR, J., SAHM, A. **A mínima quantidade de lubrificantes avaliada pelos usuários**. Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVII, nº 418, nov., 2000, p. 20-39.
- EBBRELL, S., WOOLLEY, N. H., TRIDIMAS Y. D., ALLANSON D. R., ROWE, W. B., **Effects of cutting fluid application methods on the grinding process**, International Journal of Machine Tools and Manufacture 40 (2) (2000) 209–223.
- EBBRELL, S., WOOLLEY, N. H., TRIDIMAS, Y. D., ALLANSON, D. R., ROWE, W. B. **The effects of cutting fluid application methods on the grinding process**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, School of Engineering, Liverpool, Reino Unido, vol. 40, jun., 1999, p. 209-223.
- EL BARADIE, M. A. **Cutting fluids: Part I. Characterisation**. Journal of Materials Processing Technology, Irlanda, vol. 56, 1996, p. 786-797.
- FERREIRA, M. C. **Apostila de Preparo de amostras para a realização do teste de microdureza**, UFSC. Florianópolis, 2004.
- FRANZO, C. G., Estudo **da Influência da Velocidade de Mergulho no Resultado Final de Peças Retificadas por Rebolo Convencional**. Bauru, 2002.
- FUSSE, R. Y., Bianchi, E. C., França, T. V., Silva, L. R. E Aguiar, P. R., **Erros Geométricos na Retificação do Aço Sae Hvn-3**. Revista Máquinas & Metais, Aranda Editora, Ano XI, Nº464, Pp. 150-163, Setembro 2004.
- GOLDSTEIN, J., NEWBURY, D.; ECHLIN, P.; JOY, D. C. **Scanning electron microscopy and microanalysis: a text for biologists, materials scientists and geologists**. Plenum Pub Corp, 2nd edition, USA, 1992, 820 p.
- GOMES, J. J. F. **Implementação de sistema automático de calibração dimensional em retificadoras CNC utilizando emissão acústica**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, SP, Brasil, 1997, 80p.
- GOYAN, R. L. **Biodegradable lubricants**. Lubrication Engineering, Illinois, vol. 54, nº 7, July, 1998, p. 10-17.
- GRAF, W. **Cylindrical Grinding**. Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 87p., 2004.
- GUO, C. **Energy partition and cooling during grinding**. In: 3rd International Machining & Grinding Conference, SME, October 4-7, Cincinnati, Ohio, USA, 1999, p. 1-12.
- GUO, C., MALKIN, S. **Analysis of Energy Partition in Grinding**. Asme Journal of Engineering for Industry, Vol. 117, 1995a, p. 55-61.
- GUO, C., MALKIN, S. **Analysis of Fluid Flow Through the Grinding Zone**. Asme Journal of Engineering for Industry, Vol. 104, 1992, p.P.427.

GUO, C., MALKIN, S. **Analysis of Transient Temperature in Grinding.** Asme Journal of Engineering for Industry, Vol. 117, 1995b, p. 571-577.

GUO, C.; CHAND, R.H. **A ceramic machining primer.** Ceramic Industry, 4, p.71-78, 1998.

HARA, C. M. **Uma Contribuição para o Monitoramento de Retificação Cilíndrica de Mergulho.** Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1999.

HARRIS, D. O., TATRO, C. A., LIPTAI, R. G. **A Introduction to Acoustic Emission.** American Society for Testing and Materials., P.3-10, 1972.

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

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

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

HITCHINER, M. P. **Precision grinding systems for production grinding with vitrified CBN.** SME Technical Paper MR90-507, 1990, p. 1-11.

HOWES, T. D., TOENSCHOFF, H. K., HEUER, W. **Environmental aspects of grinding fluids.** In: Annals of the CIRP, Keynote Paper, vol. 40, nº 2, August, 1991, p. 623-630.

HOWES, T. D., TONSHOFF, H.K., HEUER, W. **Environmental Aspects of Grinding Fluids.** Cirp Grinding Stc Keynote Paper, 1991.

INASAKI, I. **Monitoring and optimization of grinding process.** Annals of the CIRP 1990, v. 40.

IRANI, R.A., BAUER, R.J., WARKENTIN, A., **A review of cutting fluid application in the grinding process,** International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1696–1705.

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

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

JOHNSON, G. A. **Beneficial compressive residual stress resulting from CBN grinding.** SME Second International Grinding Conference, Philadelphia, Pennsylvania, 1996, p. 1-12.

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

JUNIOR, J. F. **Contribuição para implementação de funções de retificação inteligente (R.I.) utilizando técnicas de monitoramento por emissão acústica.** Tese (Doutorado) - USP, São Carlos, SP, Brasil, 1996, 138p.

KING, R. I. E., HAHN, R. S. **Handbook of Modern Technology**. New York, Chapman And Hall, 1986.

KING, R. I., HAHN, R. S., **Handbook of Modern Grinding Technology**. 3^a Ed., Cap.6, P.119-167, 1992.

KLOCKE, F., BECK, T., EISENBLÄTTER, G., FRITSCH, R., LUNG, D., PÖHLS, M. **Applications of Minimal Quantity Lubrication (MQL) in cutting and grinding**. In: 12th International Colloquium Industrial and Automotive Lubrication, Technische Akademie Esslingen, 11-13 jan., 2000b, 14p.

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

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

KLOCKE, F.; BECK, T.; EISENBLÄTTER, G.; FRITSCH, R.; LUNG, D.; PÖHLS, M. **“Applications of minimal quantity lubrication (MQL) in cutting and grinding”**, Institute of Machine Tools and Production Engineering, University of Technology, 2001

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

KOHLI, S. P., GUO, C.; MALKIN, S. **Energy Partition for Grinding with Aluminum Oxide and CBN Abrasive Wheels**. ASME Journal of Engineering for industry, vol. 117, 1995, p. 160-168.

KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen**. Bohren. Band 1. 3^o Ed. VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf, 1990.

KÖNIG, W. **Tecnologia de fabricação: retificação, brunimento e lapidação**. Tradução Weingaertner, W. L., VDI-Verlag, Düsseldorf, Alemanha, vol. 2, 1980, p. 89-99.

KÖNIG, W., KNOP, M. **Retificação: métodos para prever o comportamento do processo**. Revista Máquinas e Metais, Ano XXVI, n° 301, Fevereiro, 1991, p.48-62.

KÖNIG, W., MEYEN, H. P. **AE in grinding and dressing: accuracy and process reliability**. In: 4th International Grinding Conference, Dearborn, Michigan, 1990.

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

KRAR, S. F. **Grinding technology**. Delmar Publishers Inc., Second Edition, USA, 1994, p. 165-319, ISBN 0-8273-6390-7.

KRAR, S. F., RATTERMAN, E. **Superabrasives: Grinding and Machining With CBN and Diamond**. McGraw-Hill, Inc., Usa. 1990, p. 196.

LANTZ, M. A. **Chemical and mechanical considerations in reducing mist – A case study**. Lubrication Engineering, Illinois, vol. 53, n° 9, Sept., 1997, p. 14-16.

LAVINE, A. S. **A Simple Model for Convective Cooling During the Grinding Process**. Asme Journal of Engineering for Industry, Vol. 110, 1988, p. 1-6.

- LAVINE, A. S., Malkin, S. **The Role of Cooling in Creep-Feed Grinding.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 110, 1990.
- LEE, D.E.; HWANG, I.; VALENTE, C. M. O.; OLIVEIRA J. F. G., DORNFELD, D.A.; **Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission,** International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 176–188.
- LEE, E. S., KIM, J. D., KIM, N. H. **Plunge grinding characteristics using with CBN wheels.** In: Annals of the CIRP, vol. 38, n° 1, 2003, p. 557-560.
- LEE, E. S., KIM, N. H. **A study on the machining characteristics in the external plunge grinding using the current signal of the spindle motor.** International Journal of Machining Tools & Manufacture, n° 41, 2001, p. 937-951.
- LIAO, Y. S.; LUO, S. Y.; YANG, T. H. **A thermal model of the wet grinding process.** Journal of Materials Processing Technology, n° 101, 2000, p. 137-145.
- LIRANI, J. **Introdução à Metrologia Industrial.** Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.
- MACHADO, A. R., DINIZ, A. E. **Vantagens e desvantagens do uso de fluidos de corte.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVII, n° 419, dez., 2000, p. 134-151.
- MACHADO, A. R., SILVA, M. B. **Usinagem dos metais.** Editora da Universidade Federal de Uberlândia, 4ª Edição, Uberlândia, MG, Brasil, 1999.
- MALKIN S., HWANG T. W., “**Grinding mechanism for ceramics**”, Annals CIRP, 45(2), pp. 569, 1996.
- 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.
- MALKIN, S. **Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage.** In: MALKIN, S. Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, Cap. 5 e 6, 1989, p. 108 a 171.
- MALKIN, S. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives,** 1a edição, Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.
- MARSHALL, E. R., SHAW, M. C., **Forces in Dry Surface Grinding.** Trans. Asme, 74, 1952, p. 51.
- MAYER, J. E. e FANG G. P. **Diamond grinding of silicon nitride ceramic.** Machining of advanced ceramics Conf. NIST, July, 1993, p. 171-183.
- 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, 1999, p. 13-32.
- 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, 171p.
- MONICI, R. D., **Relatório de Estágio Supervisionado,** CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, Bauru, SP, Brasil, Novembro, 1999, 33p.

- MOTTA, M. F., MACHADO A. R. **Fluidos de corte: tipos, funções, seleção, métodos de aplicação e manutenção.** Revista Máquinas e Metais, Setembro, 1995, p. 44-56.
- NGUYEN, T., ZHANG L.C., **An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding,** Journal of Materials Processing Technology 140 (1-3) (2003) 224-230.
- NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica.** Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1994.
- NOVASKI, O., DÖRR, J. **Usinagem quase a seco.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVI, nº 406, Novembro, 1999b, p. 34-41.
- NOVASKI, O., DÖRR, J. **Usinagem sem refrigeração.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXV, nº 398, Março, 1999a, p. 18-27.
- NOVASKI, O., RIOS, M. **Introdução teórica e vantagens de uso na usinagem de aços liga.** Revista Máquinas e Metais, Ano XL, nº 460, Maio, 2004, p. 214-223.
- NOVASKI, O., RIOS, M. **Vantagens do uso de fluidos sintéticos na usinagem.** Revista Metal Mecânica, Ano XX, nº 118, Abril/Maio, 2002, p. 56-62.
- NUSSBAUM, O. H. C. **Rebolos e Abrasivos - Tecnologia Básica.** Ícone Editora Ltda, 1988.
- OBIKAWA, T., KAMATA, Y., SHINOZUKA, J. **High-speed grooving with applying MQL,** International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1854-1861
- 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, 1988, 272 p.
- 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.
- OLIVEIRA, J. F. G. de, BIANCHI, E. C., SOUZA, G. F. **O desempenho de rebolos pode ser controlado pela dressagem.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXVII, nº 317, Junho, 1992, p. 12-28.
- OLIVEIRA, J. F. G. **Metrologia - Principais Normas Brasileiras Relativas à Metrologia Industrial (Compilação das Normas Tb-35, Nb- 86, Nb-93, Nb-172, P-Nb-273).** São Carlos, 1984.
- OLIVEIRA, J. F. G. **Tópicos avançados sobre o processo de retificação.** Reimpressão. Universidade de São Paulo, USP, Setembro, 1998.
- OLIVEIRA, J. F. G., BIANCHI, E. C., SOUZA, G. F. **O comportamento da vida de rebolos na retificação: sua importância em máquinas CN/CNC.** In: Seminário de comando numérico no Brasil, São Paulo, Brasil, Anais, 1990, p. 1-21.
- OLIVEIRA, J. F. G.; SILVA, E. J.; BIFFI, M. **New architecture control system for an intelligent high speed grinder.** Abrasives Magazine, October/November, 2002.
- OLIVEIRA, J. F. O. **Tópicos Avançados Sobre o Processo de Retificação.** Reimpressão em Setembro 1998.

- PETERS, J., SNOEYS, R., MARIS, M. **Thermally Induced Damages in Grinding**. Annals of the Cirp, 1978, p. 571-581.
- POLLOCK, A. **Acoustic emission inspection**. Metal Handbook, 9th Edition, American Society for Metals, vol. 17, 1989, p. 278-294.
- QUEIROZ, J. L. L., BOEHS, L., SANTANA, F. **Proposta para aprimorar o manejo dos fluidos de corte**. Revista Máquinas e Metais, Abril, 1999, p. 250-255.
- RAVINDRA, H.V.; SRINIVASSA, Y.G.; KRISHNAMURTHY, R.; **Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting**, Wear 212 (1997) 78-84.
- RIOS, M. R. S. **Estudo do comportamento do fluido sintético na furação de aço inoxidável**. Dissertação de Mestrado – UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, Julho, 2002, 81p.
- ROWE, W. B., BLACK, S. C. E., MILLS, B. **Temperature control in (CBN) grinding**. International Journal of Manufacturing Technology, Liverpool, England, 1996, p. 387.
- ROWE, W. B.; MORGAN, M. N., **The effect of deformation on the contact area in grinding**. In: Annals of the CIRP, vol. 42/1, 1993.
- RUNGE, P. R. F., DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas indústrias – produção, manutenção e controle**. Cotia, SP, Brasil, Triboconcept Edições Técnicas, 1990, p. 71-171.
- SALES, W. F. **Determinação das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte**. Tese de Doutorado, Uberlândia, MG, Abril, 1999, 166p.
- SCHUITEK, A. J., SEVERIANO, A. C., BELLOS, N. L. **Um caso bem-sucedido de uso de rebolos de CBN**. Revista Máquinas e Metais, Aranda Editora, Outubro, 2001, p. 112-125.
- SCHWARZ, J. **O ótimo superacabamento começa pelo acabamento certo**. Revista Máquinas e Metais, Dezembro, 1999, p. 126-133.
- SEVERINO, A. J. **Metodologia do Trabalho Científico**. 22ª Edição, Cortez Editora, São Paulo Sp; 2002.
- SHAW, M. C. **Principles of abrasives processing**. Oxford Science on Advanced Manufacturing, New York, USA, 1996, 574 p.
- SHAW, M. **Heat-affect zones in grinding steels**. Annals of the CIRP, vol. 43/1, 1994, p. 279-282.
- SHELL. **Curso de lubrificação industrial – Fluidos de corte**. Centro de treinamento, Shell do Brasil S.A., Divisão Petróleo, Imp. Metodista, 1991, 40 p.
- SILVA NETO, J. C., SILVA, M. B. **Retificação superabrasiva e convencional de aço rápido**. Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVII, nº 425, Junho, 2001, p. 152-161.
- SILVA, E. J. **Análise da influência dos tipos de fluido de corte e rebolo na retificação do aço SAE HVN-3**. Dissertação de Mestrado – UNESP, Bauru, SP, Brasil, 2000, p.35-44.
- SILVA, E. J., BIANCHI, E. C., SOUZA, G. F., FORTULAN, C. A., FERNANDES, O. C., VALARELLI, I. D., AGUIAR, P. R. **Avaliação do mecanismo de remoção e da integridade superficial**. Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVI, nº 407, Dezembro, 1999, p.70-83.

- SILVA, L. R., BIANCHI, E. C., FUSSE, R. Y., FRANÇA, T. V., NETO, L. D., CATAI, R. E., AGUIAR, P. R. **Aplicação da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante - MQL no processo de retificação.** In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2004, Belém, Pará, Brasil, 2004.
- SIMON, T. A. **O Estágio Atual da Tecnologia das Máquinas-Ferramentas.** Revista Máquinas e Metais, 1999, p. 88-108.
- SOARES, D. D., OLIVEIRA, J. F. G. **Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVIII, nº 436, Maio, 2002, p. 140 - 157.
- SOKOVIC, M., MIJANOVIC, K. **Ecological aspects of cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes.** Journal of Materials Processing Technology, Slovenia, nº 109, 2001, p. 181-189.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos.** Editora da UFSC, Florianópolis, 314 p., 1992.
- STEPHENSON, D. J.; SUN, X.; ZERVOS, C.; **A study on ELID ultra precision grinding of optical glass with acoustic emission,** International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1053–1063.
- TAYLOR HOBSON. **“Manual da máquina TALYROND 31C.”** 2001.
- TÖNSHOFF, H. K., FRIEMUTH, T., BECKER, J. C. **Process monitoring in grinding.** In: Annals of the CIRP, vol. 51, nº 2, 2002, p. 551-571.
- TÖNSHOFF, H.K.; LIERSE, T.; INASAKI, I., **Grinding of advanced ceramics.** In: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. Machining of Ceramics and Composites, Marcel Dekker, Cap.3, 1999
- TONSHOFF, H.K.; MEYER, T.; WOBKER, H.G. **“Machining Advanced Ceramics with Speed Stroke Grinding”** Ceramic Industry, p.17-21, July 1996.
- TSO, P. L., YANG, S. Y., **The Compensation of Geometrical Errors on Forming Grinding.** Journal of Materials Processing Technology 73 ,1998, p. 82-88.
- VANSEVENANT, I. R. E. **An Improved Mathematical Model to Predict Residual Stresses in Surface Plunge Grinding.** *Annals of the Cirp.* 36, p. 413-416, 1989.
- VIEIRA , S. **Princípios de estatística.** Ed. Pioneira, 1999, São Paulo.
- VIEIRA JÚNIOR, M., LIBARDI, R., CANCELIERI, H. A., LIMA, A. **Como o calor pode afetar a integridade superficial das peças.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXV, nº 397, Fevereiro, 1999, p. 28-36.
- WEBSTER, J. A. **Selection of coolant type and application technique in grinding.** Supergrind, University of Connecticut, USA, 1995, p. 205-220.
- WEBSTER, J. A. DONG, W. P., LINDSAY, R. **Raw acoustic emission signal analysis of grinding process.** In: Annals of the CIRP, vol. 45, nº 1, 1996, p. 335-340.
- WEBSTER, J. A. **Optimizing coolant application systems for high productivity grinding.** ABRASIVES Magazine, October/November, 1999, p. 34-41.

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

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

WEBSTER, J; BRINKSMEIER E.; HEINZEL C.; WITTMAN M., THOENS K., **Assessment of grinding fluid effectiveness in continuous-dress creep feed grinding,** CIRP Annals 48 (2) (2002) 581–598.

WEINGAERTNER, W. L., TABORGA, A. R. M., TABORGA, J. D. M. **Análise dos danos térmicos na retificação.** In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, ABM, vol. 14, 2001, p. 334-342.

WEINGAERTNER, W., SCHROETER, R., TEIXEIRA, C. R. **As Influências da Minimização do Fluido de Corte.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVI, Nº 408, P 52-59, 2000.

WINTER-GRUPO SAINT GOBAIN. **Retificação.** Apostila de treinamento da Empresa Winter, Jundiaí, SP, Brasil, 2004.

YOUNG, P., BYRNE, G., COTTERELL, M. **Manufacturing and the Environment.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.13, 1997, p. 488-493.