UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

HAMILTON FUNES JUNIOR

UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE (MQL) COM ADIÇÃO DE ÁGUA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE AÇOS ENDURECIDOS COM REBOLOS DE CBN

BAURU
2012

HAMILTON FUNES JUNIOR

UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE (MQL) COM ADIÇÃO DE ÁGUA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE AÇOS ENDURECIDOS COM REBOLOS DE CBN

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de Mestre junto à Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Programa de Pós – Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi
Co-orientador: Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

BAURU
2012

Funes Junior, Hamilton.

Utilização da técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) com adição de água na retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos com rebolos de CBN / Hamilton Funes Junior, 2012

92 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2012

1. Retificação cilíndrica. 2. Mínima quantidade de lubrificante. 3. Rebolos de CBN. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências. II. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE BAURU
FACULDADE DE CIENCIAS DE BAURU

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE HAMILTON FUNES JUNIOR, 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 2012, às 09:00 horas, no(a) Campus Experimental da UNESP / Sorocaba, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. AMAURI HASSUI do(a) Faculdade de Engenharia Mecanica / Universidade Estadual de Campinas, Prof. Dr. NILSON CRISTINO DA CRUZ do(a) Coordenadoria Executiva / Unidade de Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a argüição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de HAMILTON FUNES JUNIOR, intitulado "UTILIZAÇÃO DA TECNICA DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE (MQL) COM ADIÇÃO DE ÁGUA NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DE MERGULHO DE AÇOS ENDURECIDOS COM REBOLOS 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. EDUARDO CARLOS BIANCHI

Prof. Dr. AMAURI HASSUI

Prof. Dr. NILSON CRISTINO DA CRUZ

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais Vânia Brançan Vettorazo Funes e Hamilton Funes, aos meus irmãos Renan Vettorazo Funes e Vinicius Vettorazo Funes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar saúde e forças durante os momentos difíceis deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi pela amizade companheirismo, paciência, confiança e por me ajudar nos momentos difíceis que ocorreram durante este trabalho.

Ao professor Dr. Anselmo Eduardo Diniz da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp que participou da parceria deste projeto junto a Faculdade de Engenharia da UNESP de Bauru e por aceitar a me co-orientar neste trabalho.

Ao professor Dr. Paulo Roberto de Aguiar pelo apoio concedido e pela troca de experiência durante este trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela concessão de recursos que foi de grande importância para a elaboração deste trabalho.

Em especial ao Doutorando Luiz Mauricio Gonçalves Neto, pela amizade, companheirismo, por sempre me ajudar durante os momentos difíceis durante este trabalho, enfim por incentivar à pesquisa.

À Faculdade de Engenharia da UNESP – campus de Bauru, por disponibilizar os Laboratórios de Usinagem por Abrasão e de Materiais durante a execução deste trabalho.

Ao discente de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru Rafael de Melo Bellentani que me ajudou em todas as etapas deste trabalho.

À empresa MAHLE metal leve S.A, por ceder o Laboratório de Metrologia para realizar as análises de tensão residual nos corpos-de-prova.

À empresa INA - Schaeffler Group do Brasil Ltda, em especial ao Engenheiro Gilvan por ceder o Laboratório de Materiais para a preparação dos corpos-de-prova e análise de microscopia óptica.

À empresa ITW Chemical Products, pela doação do fluído de corte utilizado durante este trabalho.

Aos professores doutores da UNESP campus experimental de Sorocaba Nilson Cristino da Cruz, José Roberto Ribeiro Bortoleto, Elidiane Cipriano Rangel, Steven Frederick Durrant e Sandro Donnini Mancini.

À todos os familiares, amigos e colegas que ajudaram de forma direta e indireta durante este trabalho.

EPÍGRAFE

"A pior evidência da insanidade é fazer as mesmas coisas todos os dias e esperar um resultado diferente na vida"

Albert Einstein 1879 – 1955

RESUMO

O uso do fluido de corte é imprescindível para processos de usinagem em que há elevada geração de calor, principalmente no processo de retificação. A utilização de fluido de corte, no entanto, causa uma série de complicações, especialmente nos aspectos ambientais, econômicos e com relação à saúde dos operadores de máquinas. Assim, intensificaram-se estudos para novos métodos de aplicação e otimização do fluido de corte visando a sua redução, bem como os problemas ocasionados por esse. Sobre essa tendência, este trabalho analisa o comportamento de um método recente, até então aplicado somente em processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, que consiste na adição de água no método da mínima quantidade de lubrificante (MQL). Foram avaliados três tipos de proporção na mistura óleo-ar e água (1:1, 1:3 e 1:5 parte de óleo/partes de água). Para uma melhor avaliação desse método, os resultados obtidos foram comparados com outros dois métodos de lubri-refrigeração, a lubri-refrigeração convencional (fluído em abundância) e o MQL tradicional (óleo-ar). Os métodos de lubri-refrigeração foram avaliados com base nos resultados das variáveis de saída: rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo, tensão residual e microdureza. Os resultados obtidos para o método MQL com adição de água conduzem a melhorias significativas com relação ao método da MQL tradicional e estes resultados são bem próximos aos obtidos com a lubri-refrigeração convencional, para os resultados de rugosidade, circularidade e desgaste diametral do rebolo, além da isenção de danos térmicos às peças.

Palavras-chave: Retificação cilíndrica, mínima quantidade de lubrificante (MQL), mínima quantidade de lubrificação com adição de água, rebolos de CBN.

ABSTRACT

The use of cutting fluid is essential for the grinding process where there is high temperature, as in the grinding process. The use of cutting fluid, however causes a series of complication, especially in the environmental and economical aspects and in relation to the health of the machine operators. Therefore, there were more studies to develop new methods of application and optimization of fluid, aiming at the reduction, as well as the problems caused by the fluids. Regarding this trend, this paper has as an objective the analyzes of the behavior of a recent method, applied only to the grinding process with tools with defined geometry, it consists of the addition of water in the minimum quantity of lubrication method (MQL). This paper has analyzed three types of proportion in the mixture oil-air and water (1:1, 1:3 and 1:5). For a better assessment of this method, the obtained results were compared to other two lubri-cooling methods, the conventional method (fluid in abundance) and the traditional MQL (oil-air). The methods of the lubri-cooling studied were analyzed through the output of the variables of the grinding process: roughness, roundness, wear of the grinding wheel (relation G) and microhardness The obtained results show that the minimum quantity of lubrication (MQL) with addition of water have a significant improvement in relation to the conventional method and these results are close to the obtained results with the conventional lubri-cooling (in abundance), for the results of roughness, roundness and wear of the grinding wheel, as well as exemption of the thermal damage of pieces.

Key-words: Cylindrical grinding, minimum quantity of lubrication (MQL), minimum quantity of lubrication with addition of water, CBN grinding Wheel.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 Objetivo 17
1.2 Justificativa 17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
2.1 O Processo de retificação 19
2.2 Retificação cilíndrica externa de mergulho 20
2.3 Principais parâmetros de corte envolvidos na retificação 22
2.3.1 Profundidade de corte (a) 22
2.3.2 Velocidade de mergulho (v_f) 23
2.3.3 Velocidade de corte (v_s) 23
2.3.4 Velocidade da peça (v_w) 24
2.3.5 Espessura equivalente de corte (h_{eq}) 25
2.4 Danos térmicos decorrentes do processo de retificação 26
2.5 Principais danos térmicos 26
2.5.1 Queima superficial da peça 26
2.5.2 Retêmpera 27
2.5.3 Super-revenimento 28
2.5.4 Tensões residuais 29
2.5.5 Trincas 30
2.6 Ferramenta abrasiva 33
2.6.1 Rebolos superabrasivos de CBN 34
2.7 Dressagem 35
2.7.1 Grau de recobrimento (U_d) 35
2.7.2 Dressadores 37
2.7.3 Dressadores estáticos 37
2.8 VARIÁVEIS DE SAÍDA ANALISADAS DURANTE O PROCESSO 38
2.8.1 Rugosidade 38
2.8.2 Circularidade 39
2.8.3 Desgaste diametral do rebolo 40
2.8.4 Microdureza 41
2.9 Análise microestrutural 41
2.10 Fluídos de corte 42

2.10.1 Importância das aplicações dos fluídos de corte no processo de retificação....42
2.10.2 Funções dos fluídos de corte 43
2.10.3 Danos à saúde causados pelos fluídos de corte 43
2.10.4 Manutenção dos fluídos de corte 44
2.10.5 Descarte dos fluídos de corte....45
2.10.6 Classificação dos fluídos de corte 45
2.11 O método da mínima quantidade de lubrificante (MQL) 47
2.11.1 O método da mínima quantidade de lubrificante (MQL) com adição de água 48
2.12 Empastamento das porosidades do rebolo....49
2.12.1 O sistema de limpeza de rebolos através da aplicação de jatos de ar comprimido....50
3 MATERIAIS E MÉTODOS....53
3.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS 53
3.1.1 Retificadora cilíndrica externa de mergulho 53
3.1.2 Corpos-de-prova 53
3.1.3 Ferramenta abrasiva....54
3.1.4 Fluído de corte 54
3.1.5 Dressador 55
3.1.6 A técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL)....55
3.1.7 A técnica convencional de lubri-refrigeração....58
3.1.8 O método de limpeza da superfície do rebolo 58
3.2 Metodologia utilizada durante os ensaios....61
3.3 Medição das variáveis de saída do processo de retificação....64
3.3.1 Rugosidade 64
3.3.2 Circularidade 65
3.3.3 Desgaste diametral do rebolo 65
3.3.4 Tensão Residual....66
3.3.5 Microdureza....67
3.4 Análise de microestrutura....67
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES....68
4.1 Rugosidade 68
4.2 Circularidade 70
4.3 Desgaste diametral....71
4.4 Tensão residual 73

4.5 Análise microestrutural 75
4.6 Microdureza 79
5 CONCLUSÕES 81
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 82
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

a – profundidade de corte [mm]

Al_2O_3 – óxido de alumínio

ANOVA – análise de variância

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

b_d – largura de atuação do dressador [mm]

CBN – nitreto de boro cúbico

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

CNC - Comando numérico computadorizado

d_s – diâmetro da peça [mm]

d_w – diâmetro do rebolo [mm]

f_{ad} – Avanço axial de dressagem [mm/min]

G - Relação G [-]

HR_c - Dureza Rockwell C

HV – Dureza Vickers

h_{eq} - espessura equivalente de corte [μm]

MQL – mínima quantidade de lubrificante

MO – microscopia óptica

$Q_{w'}$ = taxa de remoção específica de material [mm^2/s]

R_a – rugosidade média [μm]

RMB – ruído magnético de Barkhausen [-]

v_f – velocidade de avanço [mm/min]

v_s – velocidade de corte do rebolo [m/s]

v_w – velocidade da peça [m/s]

U_d – grau de recobrimento [-]

Ø – diâmetro [mm]

Z_s - volume de rebolo gasto [mm^3]

Z_w - volume de material removido [mm^3]

1 INTRODUÇÃO

Segundo Diniz *et al.,* (2008), o processo de retificação é aplicado na fabricação de componentes de maior qualidade em termos forma (tolerâncias dimensionais e geométricas compatíveis) e acabamento superficial, considera-se um processo de acabamento, realizado nas últimas etapas de usinagem.

A retificação, entretanto, é uma das operações que mais geram complicações na usinagem. O calor gerado durante o processo de retificação tem sua maior intensidade na região de contato entre peça/rebolo, penetrando ao centro da mesma, facilitando assim a formação de dilatações térmicas que são prejudiciais à qualidade final das peças. Marinescu *et al.,* (2004) ressalta que as elevadas temperaturas geradas durante o processo de retificação provocam uma série de danos térmicos na superfície do material retificado como alterações microestruturais e trincas, dentre outros.

Para minimizar os danos térmicos causados durante a operação de retificação, utiliza-se fluido de corte. O uso do fluido de corte é fundamental nos processos de usinagem dos materiais, contribuem para uma maior vida da ferramenta associada a uma maior qualidade da peça (DINIZ *et al.,* 2008). A não utilização dele promove, além dos problemas citados, queda de rendimento do rebolo, entupimento das porosidades do mesmo, aumento das forças de corte, dentre outros.

O fluido de corte é considerado, portanto, um importante parâmetro tecnológico na usinagem. Além de refrigerar e lubrificar a área de corte, reduzindo o excesso de calor, ele apresenta utilidade no transporte dos cavacos (limpeza), proteção anti-corrosiva da máquina e das peças retificadas.

Apesar das vantagens apresentadas pelo fluído de corte nos processos de usinagem, sua utilização causa sérios problemas ambientais, econômicos e com relação à saúde dos operadores de máquinas (TAWAKOLI *et al.,* 2010). O seu descarte é extremamente

complicado, além de ter que seguir a legislação ambiental vigente, sua manutenção quando realizada de forma correta agregam elevados custos às empresas. Diante disso, indústrias e universidades passaram a investir em pesquisas para reduzir ou até mesmo eliminar o uso do fluido de corte.

Dentre os métodos de aplicação do fluido de corte existentes no processo de retificação, a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) surge como uma alternativa para a redução dos problemas causados pelo seu uso.

Silva *et al.,* (2007) e Tawakoli *et al.,* (2010), analisaram a aplicação da técnica da MQL na retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 e DIN 100 Cr6 utilizando rebolos convencionais de alumina, o desempenho deste é próximo ou superior a lubri-refrigeração convencional.

Há trabalhos realizados em processos de usinagem com geometria da ferramenta definida onde adiciona-se água ao sistema da MQL, diminuindo ainda mais o volume de fluido de corte utilizado. Esse último método apresenta um vasto campo de pesquisa já que na literatura formal poucos trabalhos foram publicados e nenhum deles se refere ao processo de retificação. A adição de água pode, a princípio, ser feita em diversas proporções, o que pode melhorar a refrigeração ou a lubrificação, dependendo da proporção a ser misturada.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo avaliar a eficácia da técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) com adição de água, nas proporções (1:1, 1:3, e 1:5 parte de óleo/partes de água), com relação a técnica tradicional da MQL (sem adição de água) e ao método convencional (fluído em abundância), na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 temperado e revenido com dureza de 54 HR_c, utilizando rebolo superabrasivo de Nitreto de Boro Cúbico (CBN). Também será avaliada a diluição óleo/água na técnica da MQL tradicional, que obtém melhores resultados das variáveis de saída analisadas durante o processo de retificação.

1.2 Justificativa

A retificação é um processo de usinagem que gera elevadas temperaturas na região de corte entre peça/rebolo. O uso do fluido de corte torna-se, portanto, indispensável para esse processo de usinagem. Sem a refrigeração da região de contato entre peça/rebolo, a peça poderá atingir elevadas temperaturas, ocasionando danos metalúrgicos e alterações dimensionais, não atingindo as especificações de qualidade exigida.

A utilização do fluido de corte, entretanto, tornou-se um problema para as indústrias com relação a vários aspectos. Além de causarem diversos danos à saúde dos operadores de máquinas, a sua compra e o seu descarte, quando devidamente realizado, agregam elevados custos para as indústrias. Há ainda os problemas ambientais causados pelo seu indevido descarte.

Sob pressão de órgãos ambientalistas, parlamentares passaram a elaborar leis cada vez mais rigorosas, visando proteger o meio ambiente. O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), responsável pela fiscalização das Leis Ambientais Brasileiras, com relação à

utilização e descarte dos fluídos de corte, ressalta através da Resolução n° 9, de 31 de Agosto de 1993, que é considerado crime ambiental não só descartar o óleo lubrificante na natureza, mas também comercializar, fornecer, transportar, queimar ou dar outro destino que não seja a reciclagem através do refino. Diante disso, houve um aumento da fiscalização ambiental sobre as empresas com relação o correto descarte do fluido de corte. Indústrias e universidades começaram a investir em pesquisas buscando novos métodos alternativos ao uso do fluido de corte. Enfim, de maneira geral, a sociedade passou a procurar novas maneiras de evitar os danos causados pelo uso do fluido de corte.

A técnica da MQL tradicional com adição de água é uma alternativa ao método convencional de lubri-refrigeração e a técnica tradicional da MQL (sem adição de água). Ressalta-se que não foi encontrada literatura formal alguma que apresente estudos sobre a aplicação da técnica da MQL com adição de água no processo de retificação, assim, entende-se a presente proposta seja inovadora e poderá fornecer resultados consistentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item será apresentado uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos pertinentes a este trabalho.

2.1 O Processo de retificação

Segundo Ren *et al*., (2009), a retificação é um processo de usinagem por abrasão, no qual a remoção do material é realizada pela interação do abrasivo e a peça. Diferente dos processos onde utilizam-se ferramentas de geometria definida, os abrasivos na retificação têm arestas de corte irregulares. O uso desses abrasivos é aplicado na produção de componentes de maior qualidade em termos de forma, integridade e acabamento superficial (DINIZ *et al.,* 2008).

De acordo com Malkin (1989), o processo de retificação é considerado um dos mais importantes da manufatura, pois quase todos os produtos industrializados possuem componentes que foram concebidos a partir deste processo ou a partir de máquinas que possuem a sua precisão graças à retificação.

Segundo Soares & Oliveira (2002), a retificação é um processo de alta precisão e importância o que torna inaceitável a perda de uma peça durante esta etapa, pois o valor agregado ao material é muito elevado devido aos outros processos que antecederam a retificação.

A grande geração de calor é uma complicação séria do processo que pode levar a resultados insatisfatórios. Além disso, a natureza da interação entre grãos abrasivos/peça é muito complexa e depende de vários fatores que envolvem o rebolo, peça, tipos de fluidos de corte, a máquina-ferramenta e outros parâmetros do processo. Segundo Tönshoff (1999), a complexidade da retificação é conseqüência da grande quantidade de arestas de corte, da

aleatoriedade do seu formato e da contínua alteração da geometria das arestas de corte durante a retificação, devido ao desgaste e fraturas das partículas abrasivas.

2.2 Retificação cilíndrica externa de mergulho

Na retificação cilíndrica externa de mergulho, o rebolo executa o movimento de avanço numa direção perpendicular à superfície da peça. Normalmente o rebolo é mais largo que o comprimento da peça podendo fazer a retificação de várias superfícies simultaneamente através da montagem de diversos rebolos (DINIZ *et al.,* 2008). A retificação cilíndrica externa de mergulho que foi utilizada durante este trabalho, bem como os principais parâmetros de corte envolvidos são apresentados na figura 2.

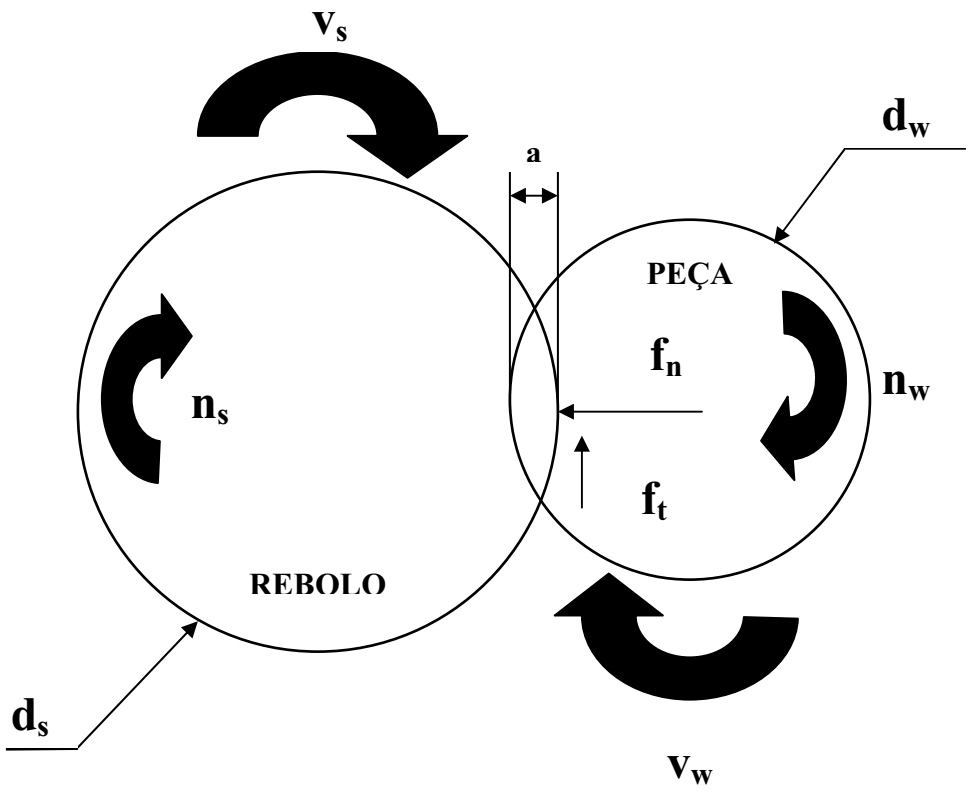


Figura 2. Retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN, 1989 - Adaptada)

onde:

d_s = diâmetro do rebolo

d_w = diâmetro da peça

a = profundidade de corte

f_t = força tangencial de corte

f_n = força normal

v_s = velocidade do rebolo

v_w = velocidade da peça

n_s = rotação do rebolo

n_w = rotação da peça

Soares & Oliveira (2002), evidenciam na figura 2.1, o ciclo de retificação e suas respectivas etapas durante o processo.

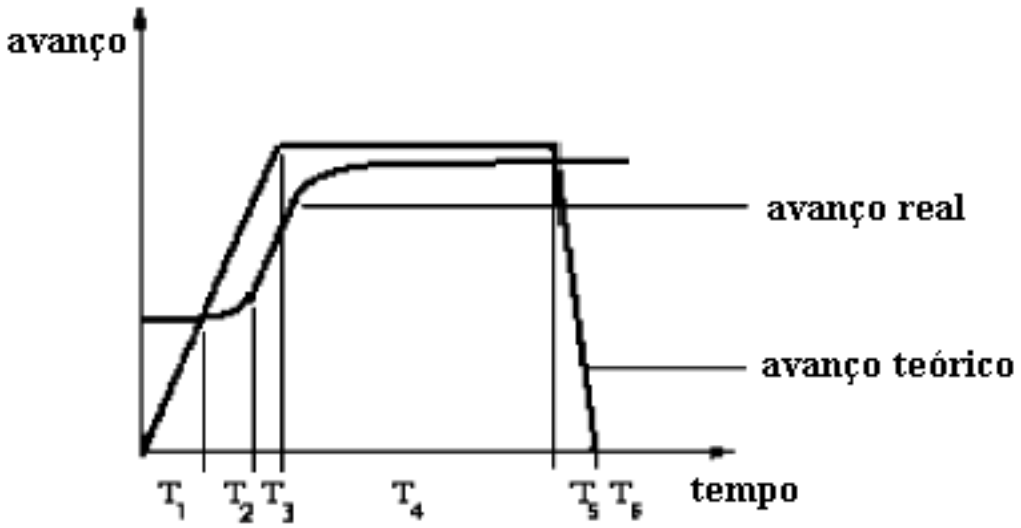


Figura 2.1. Ciclo de retificação cilíndrica de mergulho (OLIVEIRA, & OLIVEIRA, 2002)

Com relação à Figura 2.1, a seguir são descritos os intervalos de tempo indicados:

- T1: corresponde à aproximação do rebolo até perto da peça, porém sem que haja corte (remoção de material);

- T2: expressa o contato peça/rebolo e os momentâneos aumentos de potência consumida pelo motor, assim como da emissão acústica;
- T3: a profundidade de corte é igual ao avanço por volta do rebolo.
- T4: corresponde à fase de centelhamento ou ainda spark-out, que ocorre quando a peça chega a sua dimensão final. Segundo Malkin (1989), o tempo de spark-out ou centelhamento, nada mais é que o tempo necessário para a ocorrência da recuperação das deformações elásticas ocorridas durante o avanço do rebolo sobre a peça;
- T5: ocorre o afastamento do rebolo;
- T6: acontece a troca da peça de trabalho, com possível dressagem.

2.3 Principais parâmetros de corte envolvidos na retificação

Neste item são apresentados os principais parâmetros de corte envolvidos na retificação cilíndrica externa de mergulho.

2.3.1 Profundidade de corte (a)

De acordo com Catai (2004), um dos fatores que podem influenciar a eficiência do processo de retificação e prejudicar a integridade superficial da peça é a flexão que ocorre entre o rebolo e a peça. Este efeito aumenta com a área de contato e com o número de grãos do rebolo que estão em contato com a peça.

Segundo König (1980), aumentando-se a profundidade de corte “a”, 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 às maiores espessuras equivalentes dos cavacos a serem removidos.

Segundo Malkin (1989), a profundidade de corte **a** que o rebolo entra na peça**,** é definida pela equação (2.1).

$$a = \frac{\pi . d_w . v_f}{v_w} \tag{2.1}$$

Onde:

v_f = velocidade de avanço (mm/min).

v_w = velocidade da peça (mm/min).

2.3.2 Velocidade de mergulho (v_f)

Segundo Malkin (1989), a velocidade de mergulho v_f corresponde à taxa com que o rebolo avança sobre a peça, sendo também definida como velocidade de avanço.

No início da retificação, onde é realizado o desbaste, é recomendada uma velocidade de mergulho entre 0,4 a 2,0 mm/min. Já no acabamento recomendam-se velocidades entre 0,1 a 0,3 mm/min (BALDO, 1994).

2.3.3 Velocidade de corte (v_s)

A velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo v_s é representada pelo deslocamento de um ponto em certo espaço de tempo. De acordo com a empresa Winter (2004), a velocidade de corte é extremamente importante no processo de retificação, pois determina o desgaste do rebolo podendo implicar na capacidade de remoção dos grãos abrasivos e no acabamento superficial das peças.

De acordo com Graf (2004), a velocidade de corte pode ser expressa pela equação (2.2).

$$v_s = \frac{\pi . d_s . n_s}{60.1000} \tag{2.2}$$

Onde:

v_s = velocidade de corte (m/s).

n_s = rotação do rebolo (RPM).

Bianchi *et al*., (1996), Graf (2004), afirmam que aumentando a velocidade de corte, um único grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavacos, devido à elevação da freqüência 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, observa-se um aumento da potência de corte consumida e uma elevação da temperatura, o que pode ocasionar a queima da peça. Um aumento na velocidade do rebolo diminui a severidade do processo de corte pela redução da profundidade de corte (HWANG, 2000).

2.3.4 Velocidade da peça (v_w)

Segundo Graf (2004), a velocidade da peça v_w pode ser determinada em função do diâmetro e rotação da peça conforme equação (2.3).

$$v_w = \frac{\pi . d_w . n_w}{60.1000} \tag{2.3}$$

Onde:

n_w = rotação da peça (RPM).

Ainda de acordo com Graf (2004), um aumento da velocidade da peça ocasiona uma taxa de remoção de material maior, gerando cavacos mais grossos. Pode-se observar também

um aumento da carga sobre cada grão o que gera valores de força tangencial de corte mais elevadas. Desta forma um aumento da velocidade confere ao rebolo um comportamento mais macio.

2.3.5 Espessura equivalente de corte (h_{eq})

De acordo com Oliveira (1988), Catai (2004), a espessura da camada de material removida pelo rebolo numa volta completa denomina-se espessura equivalente de corte h_{eq}, e é um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho, sendo ainda definido com a relação entre a taxa de remoção específica do material Q_w' e a velocidade de corte. Segundo Graf (2004), a espessura equivalente de corte para o processo de retificação cilíndrica externa poder ser representada conforme equação (2.4).

$$h_{eq} = \frac{Q_w'}{v_s} = \frac{\pi . d_w . v_f}{60.1000.v_s} \tag{2.4}$$

Onde:

h_{eq} = espessura equivalente de corte (mm).

Conforme Malkin (1989), a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada com o comportamento do processo de retificação em função das variáveis de saída como: força de corte, rugosidade, vida da ferramenta abrasiva etc. De acordo com Catai (2004), um aumento do h_{eq} reflete no respectivo aumento das forças de corte, rugosidade e diminuição da vida do rebolo. Devido a isto, aconselha-se sempre utilizar rebolos cujas ligas suportem elevadas rotações de trabalho a fim de melhorar a rugosidade, aumentar a vida da ferramenta e diminuir os esforços de corte.

2.4 Danos térmicos decorrentes do processo de retificação

A seguir são apresentados os principais danos térmicos decorrentes do processo de retificação.

2.4.1 Principais danos térmicos

De acordo com Marinescu *et al.,* (2004), os principais danos térmicos decorrentes do processo de retificação são:

- Oxidação;
- Super-revenimento;
- Tensões residuais;
- Retêmpera;
- Trincas.

2.4.2 Queima superficial da peça

A queima superficial da peça ocorre durante a operação de retificação, devido à elevada energia gerada no processo de corte do material, produzindo um aumento de temperatura suficiente para provocar uma mudança de fase do material da peça retificada (AGUIAR, 1997).

A queima superficial é um dos danos térmicos mais comuns encontrados em peças retificadas e pode ser observada por tons azulados na peça devido a formação de uma camada de óxido, onde tal camada é responsável pelo aumento do desgaste do rebolo, potência e forças de corte (MALKIN, 1989).

Tanto a cor azulada quanto a espessura da camada de óxido provocada pela queima da superfície do material, dependem do tempo, temperatura e oxigênio presente no ambiente de retificação. As retificações com elevadas pressões e vazões dos fluidos de corte, agem

excluindo o oxigênio presente e impede a formação da camada de óxido na superfície das peças, muitas vezes a queima não é caracterizada pela presença de tons azulados na superfície das peças (SHAW, 1996).

2.4.3 Retêmpera

Durante a retificação de aços temperados e revenidos a queima superficial provoca um aumento da dureza da peça. Tal aumento é causado pela retêmpera do material, a qual é conseqüência da reaustenitização do material seguido da formação da martensita não revenida (MALKIN, 1989; MARINESCU *et al.,* 2004).

A figura 2.2 mostra a microestrutura do aço ABNT 52100 temperado e revenido, com queima na superfície retificada.

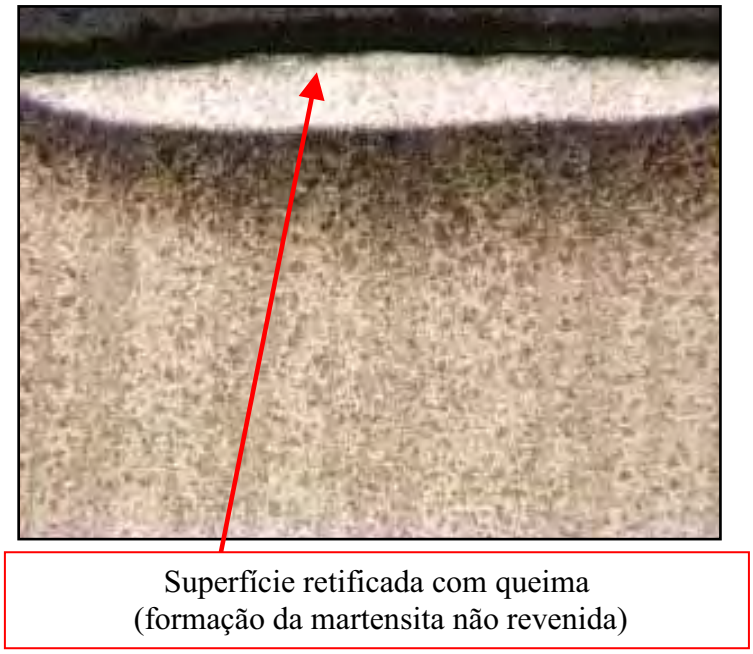


Figura 2.2 Microestrutura do aço ABNT 52100 com queima na superfície retificada (FAG, 2001)

2.4.4 Super-revenimento

O super-revenimento ocorre quando a temperatura da peça atinge valores superiores ao do último revenido, durante o processo de retificação. Aços com temperatura de revenimento baixas são mais susceptíveis a esse dano térmico, que aqueles que possuem temperatura de revenimento mais elevado.

O efeito do super-revenimento na peça é similar à de um novo revenido a temperaturas mais elevadas, sendo caracterizado pelo amolecimento da superfície retificada, ocasionando uma diminuição da dureza na superfície do material (MARINESCU *et al.,* 2004). A figura 2.3 apresenta a microestrutura do aço ABNT 52100 temperado e revenido com a presença de super-revenimento na superfície retificada.

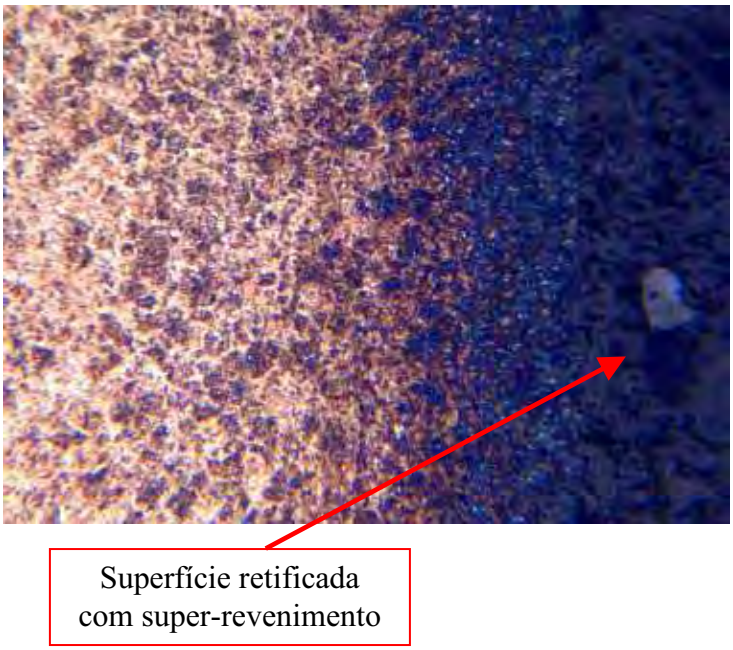


Figura 2.3 Microestrutura do aço ABNT 52100 com super-revenimento na superfície retificada (FAG, 2001)

Figura 2.4 Microestrutura do aço ABNT 52100 sem queima e super-revenimento na superfície retificada (FAG, 2001)

2.4.5 Tensões residuais

O processo de retificação provoca tensões residuais na superfície da peça acabada, onde as mesmas podem vir a comprometer o comportamento mecânico do material.

Conforme Catai *et al.* (2006), 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.

Segundo Malkin (1989), as tensões de tração são geradas por tensões introduzidas por ganho térmico e pelas 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 pelas interações dos grãos abrasivos durante a usinagem. Comparando-se as tensões de compressão e tração, tem-se que as tensões de

compressão são favoráveis às propriedades mecânicas do material, pois aumentam sua resistência a fadiga. Já as tensões de tração são desfavoráveis, causando a diminuição das resistências mecânica e ao desgaste a elevadas temperaturas (MONICI, 2003).

2.4.6 Trincas

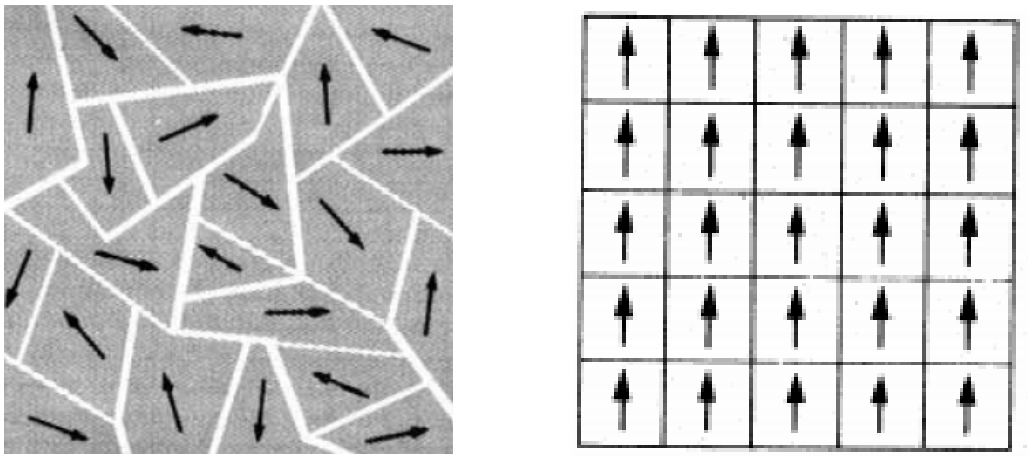
Uma das causas que compromete a integridade final das peças acabadas ocasionando trincas às peças retificadas são as elevadas temperaturas na região de contato entre peça/rebolo, onde dependendo das características do rebolo e do tipo das condições de operação, ultrapassam a 700 °C provocando alterações microestruturais nos materiais (MALKIN, 1989). O surgimento de elevadas temperaturas e resfriamento rápido causado pela inadequada lubrificação-refrigeração pode levar a formação de camadas de martensita que são extremamente frágeis e metaestáveis, podem causar defeitos como trincas e variações dimensionais e das propriedades mecânicas nas peças retificadas (CATAI, 2004).

As trincas podem ocorrer na superfície do material como também abaixo da superfície logo após a retificação das peças. Assim as trincas podem ser observadas ou não logo após a retificação. A severidade das trincas varia de acordo com o processo executado e temperaturas atingidas (JOHNSON, 1996).

Segundo Weingaertner (2001), as macrotrincas e microtrincas aparecerão na peça retificada, se as tensões residuais de tração ultrapassarem as tensões que o material resiste. Na utilização de rebolos convencionais de óxido de alumínio a probabilidade do aparecimento destas trincas é maior que nos rebolos superabrasivos, visto que maiores temperaturas aparecem na interface peça-rebolo, para este tipo de ferramenta que possui grãos abrasivos de menor condutividade térmica. As macrotrincas aparecem quando a temperatura é maior que a necessária para produzir as microtrincas.

2.5 Ruído magnético de Barkhausen (RMB)

As diversas técnicas existentes para a análise de tensões residuais dividem-se em destrutivas, semidestrutivas e não-destrutivas. A técnica de Barkhausen é caracterizada pela análise não destrutiva do material, ou seja, não necessitam de remoção de material da peça a ser analisada e não provocam qualquer tipo de dano ao equipamento que realiza a análise de tensão residual. Ainda com relação à técnica de Barkhausen, ressalta-se que a mesma é aplicável apenas para materiais ferromagnéticos. Em um material ferromagnético, como o ferro, cobalto e níquel, os spins dos elétrons de um átomo, pode facilmente influenciar, os spins de elétrons de átomos adjacentes. Com isso há a formação de grupos de 10^{-9} - 10^{-12} átomos, nos quais os momentos de dipolos magnéticos de todos os átomos apontam na direção (SALAZAR, 2008). Estes conjuntos de átomos são chamados de domínios de Weiss e os limites entre eles são as paredes de Bloch. Em uma amostra de um material magnético desmagnetizado os dipolos magnéticos de cada um dos domínios magnéticos estão orientados de forma aleatória, caso não tenha nenhum campo magnético aplicado na amostra. A figura 2.5 (a) mostra os domínios magnéticos de um material ferromagnético orientados de forma aleatória. Já a figura 2.5 (b) mostra os domínios magnéticos de um material ferromagnético magnetizado na presença de um campo magnético externo.



(a) (b)

Figura 2.5 (a) domínios magnéticos em uma amostra desmagnetizada, (b) domínios magnéticos de uma amostra magnetizada

A curva de histerese apresenta a resposta de um material ferromagnético na presença de um campo magnético externo. A figura 2.6 mostra a curva de histerese para materiais ferromagnéticos.

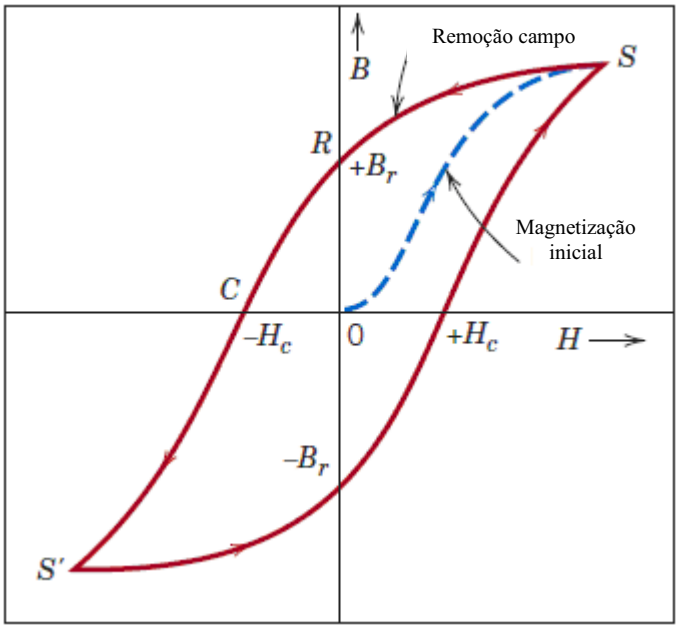


Figura 2.6 Curva de histerese para materiais ferromagnéticos (CALLISTER, 2007)

Após aplicar um campo magnético alternado na amostra, a curva de histerese será percorrida como um laço, e os domínios magnéticos terão sua direção invertida repetidamente. O movimento irreversível das paredes dos domínios, que é a causa do Ruído magnético de Barkhausen é extremamente influenciado pelos defeitos da estrutura, tais como lacunas, inclusões, variações de fase, discordâncias, imperfeições e tensões residuais no material. (SALAZAR, 2008).

Segundo Strohaecker *et al.,* (2004), a densidade de fluxo magnético num material ferromagnético, sujeito a um campo magnético oscilante, varia de forma descontínua em pequenos incrementos denominados saltos Barkhausen. Tais saltos estão relacionados com os movimentos das paredes dos domínios magnéticos e ao processo de rotação que ocorrem no interior do domínio a uma magnetização de alta intensidade (RUUD, 2000).

Após colocar uma bobina indutora na superfície da amostra a ser analisada, durante o movimento dos domínios magnéticos, a bobina captará um pulso elétrico decorrente da mudança da orientação dos domínios chamado de ruído Barkhausen. Este ruído é fortemente influenciado pelo estado de tensões residuais e da microestrutura do material.

2.6 Ferramenta abrasiva

Os rebolos em geral são ferramentas de corte constituído por inúmeros grãos abrasivos ligados por um aglutinante com forma e dimensões definidas onde cada um possui características e aplicações (DINIZ, 2004). Segundo a empresa Saint Gobain (2004), os rebolos podem efetuar o trabalho de cortar, desbastar, retificar, afiar e polir. A figura 2.9, apresenta os principais constituintes de um rebolo. Ressalta-se que foram abordados apenas os assuntos pertinentes aos rebolos de CBN, os quais foram utilizados durante este trabalho.

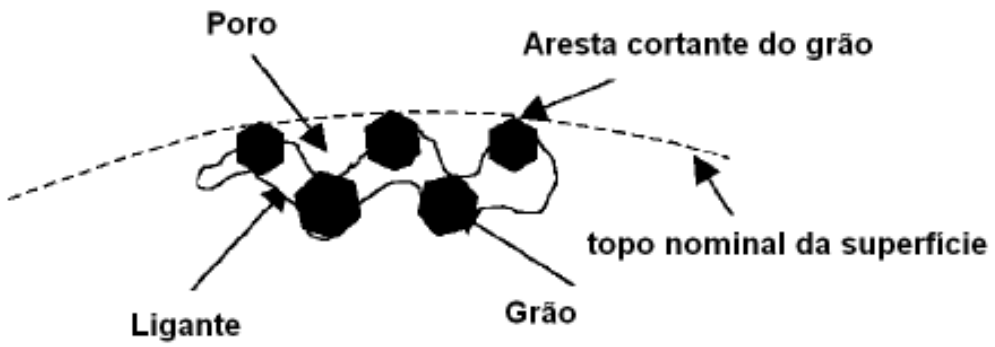


Figura 2.7 Principais constituintes de um rebolo (MARINESCU *et al*., 2007)

2.6.1 Rebolos superabrasivos de CBN

De acordo com Guo *et al.,* (2007), os rebolos de CBN vem sendo muito utilizados no lugar dos convencionais em diversos segmentos industriais. O grão superabrasivo de CBN é conhecido pela sua elevada resistência ao desgaste. A retificação com o mesmo produz menores temperaturas na região de contato entre peça/rebolo, resultando em uma menor tendência de danos térmicos, além das indesejáveis tensões residuais. Segundo Marinescu *et al.,* (2007), a grande condutividade térmica dos grãos de CBN da ordem de 1300 W/m.K propicia uma menor quantidade de calor à peça, na faixa de 20%, enquanto com o uso de óxido de alumínio esse percentual sobe para 60 -70%.

Fusse *et al.,* (2004) ressalta que quando utiliza-se rebolos de CBN há uma redução do tempo de retificação, além de um menor número de trocas de ferramentas e paradas apara ajuste visando compensar o desgaste do rebolo, há ainda uma redução de 40% dos custos totais do processo de retificação.

É importante salientar que embora os rebolos superabrasivos de CBN possuam algumas vantagens, os mesmos não podem sem aplicados a todos os processos de retificação,

sendo utilizados principalmente na retificação de metais ferrosos endurecidos, ferro fundido e superligas de níquel cobalto (BIANCHI, *et al*., 2001).

2.7 Dressagem

Segundo a empresa Winter (2003), na retificação, a superfície de corte do rebolo deve ser mantida em condição de permitir as maiores taxas de remoção de material possíveis, e garantir um acabamento superficial satisfatório. A operação de afiação de rebolos, conhecida como dressagem, visa restaurar a capacidade de corte do material da ferramenta, restabelecer sua concentricidade, e em algumas operações, a forma da superfície do rebolo. A dressagem pode ser efetuada de várias maneiras dependendo do tipo de dressador (DINIZ, 2004).

2.7.1 Grau de recobrimento (U_d)

O grau de recobrimento "U_d" é um parâmetro importante na retificação, por ser um excelente caracterizador das condições de afiação de um rebolo, pois engloba todas as condições de dressagem (MINKE, 1999).

Segundo Klocke & König (2005), o grau de recobrimento "U_d" para ferramentas de dressagem estática pode ser determinado pela equação 2.5, como a razão entre a largura de atuação do dressador "b_d" e o avanço axial de dressagem "f_{ad}".

$$U_d = \frac{b_d}{f_{ad}} \tag{2.5}$$

A Figura 2.8 ilustra o mecanismo cinemático do processo de dressagem, no qual o dressador desloca-se transversalmente ao rebolo penetrando a uma profundidade de dressagem "a_{ed}" gerando uma largura de atuação de dressagem "b_d". Este processo gera o

corte e a fratura dos grãos abrasivos pelo dressador, além de provocar o surgimento de uma rosca na superfície do rebolo (GONÇALVES, 2008).

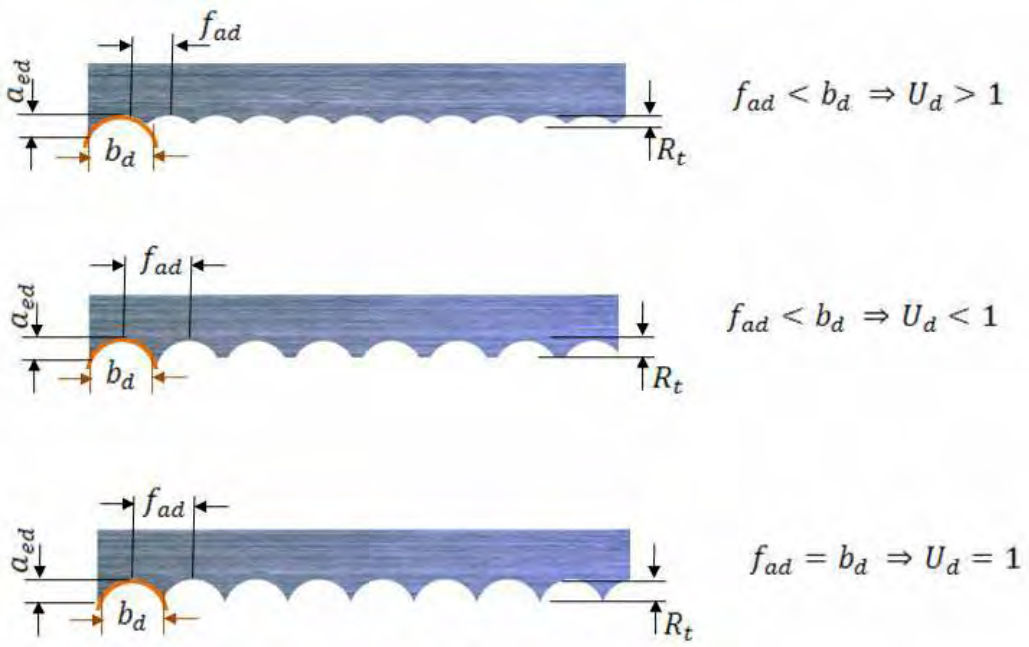


Figura 2.8 Mecanismo cinemático do processo de dressagem (KLOCKE & KÖNIG, 2005)

Segundo Wang (2008), as condições de dressagem influenciam diretamente a taxa de remoção de material que por sua vez interfere na rugosidade da peça produzida. Na dressagem grossa, onde o grau de recobrimento é pequeno e o número de arestas atuantes é reduzido, provoca-se um aumento na profundidade dos sulcos que, consequentemente, fornece valores mais elevados na rugosidade da peça. Já na dressagem fina, onde os valores de grau de recobrimento são maiores, um número maior de arestas atuantes divide os esforços e cada grão abrasivo penetra menos na peça, reduzindo assim os valores de rugosidade.

Quando são utilizados valores de "U_d" igual a 1,0, são produzidas as mais altas taxas de remoção de material, onde normalmente a rugosidade não é um fator de importância, no entanto quando são utilizados valores de "U_d" > 1,0, são produzidos baixos valores de

rugosidade. Valores de "f_{ad}" maiores que "b_d" não devem ser utilizados, pois algumas partes da superfície do rebolo não serão dressadas (OLIVEIRA, 1988).

2.7.2 Dressadores

De acordo com König (1993), as ferramentas de dressagem se distinguem de acordo com o princípio cinemático de ação: ferramentas estáticas e rotativas. Para as ferramentas estáticas, ao contrário das ferramentas rotativas, não existe um movimento de rotação da ferramenta, apenas translação. A seguir passa-se a descrever apenas sobre os dressadores estáticos que foi utilizado durante este trabalho.

2.7.3 Dressadores estáticos

Segundo a empresa Winter (2003), os dressadores têm como função:

- Manter a agressividade do rebolo, eliminando os grãos abrasivos gastos e os materiais incrustados entre os grãos;
- Manter as formas geométricas (perfis) do rebolo e produzir peças dentro das dimensões e rugosidades exigidas.

Diante dos vários tipos de dressadores estáticos existentes no mercado, cada um deles tem suas particularidades em relação ao tipo de aglomerante específico dos rebolos. Os dressadores estáticos mais utilizados estão representados conforme figura 2.9.

Figura 2.9 Dressadores estáticos (KLOCKE & KÖNIG, 2005)

2.8 VARIÁVEIS DE SAÍDA ANALISADAS DURANTE O PROCESSO

A seguir são apresentadas as variáveis de saída analisadas durante este trabalho tais como: rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo, tensões residuais e microdureza.

2.8.1 Rugosidade

Inicialmente é importante salientar que o acabamento superficial pode afetar de forma significativa a resistência mecânica dos componentes usinados quando os mesmos são submetidos a ciclos de fadiga (HECKER & LIANG, 2003).

De acordo com Agostinho *et al*. (1981), rugosidade são micro-irregularidades decorrentes do processo de fabricação. Sua quantificação é feito pelos parâmetros de altura e largura das irregularidades. Sua magnitude está diretamente relacionada com as propriedades físicas do material como: coeficiente de atrito, desgaste, lubrificação, transmissão de calor, resistência mecânica dentre outras.

Segundo Catai (2004), os processos de usinagem, em especial a retificação afetam diretamente a rugosidade e o controle deste parâmetro é feito pelo gerenciamento e otimização dos processos e condições de usinagem.

Há várias formas de amenizar a rugosidade de uma peça. Dentre estas pode ressaltar o tipo de rebolo utilizado, as condições de dressagem (afiação) do rebolo, os parâmetros de corte utilizado (taxa de remoção de material, o tempo de centelhamento dentre outros), o tipo de fluído de corte, e especificadamente a forma de aplicação.

2.8.2 Circularidade

Segundo Catai *et al.,* (2006), uma peça nunca é perfeitamente cilíndrica, pois em todas estão presentes erros de circularidade. Gonçalves (2008) ressalta que o erro de circularidade de uma peça cilíndrica é o desvio radial macro geométrico do contorno externo a um formato circular ideal.

A figura 2.10 apresenta uma peça cilíndrica com erro de circularidade, que passou por algum processo de manufatura como, por exemplo, a retificação.

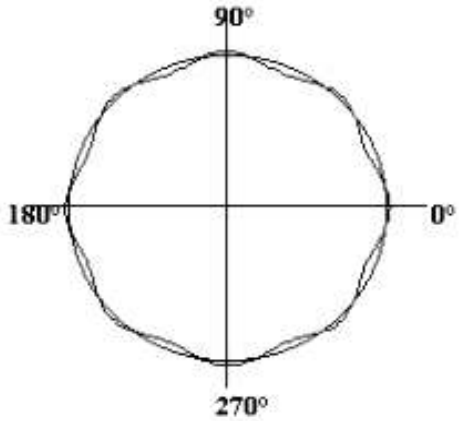


Figura 2.10 Erro de circularidade de uma peça cilíndrica (CATAI, 2004)

O calor gerado durante o processo de retificação tem sua maior intensidade na região de contato entre peça/rebolo, penetrando ao centro da mesma. Com isso, quanto maior a

dificuldade do fluído de corte adentrar na região de contato entre peça/rebolo, maior será o calor gerado na peça, facilitando assim a formação de deformações térmicas, que acarretam em erros de circularidade. Ressalta-se também que as vibrações da máquina assim como os parâmetros de corte utilizados também influenciam esta variável (MALKIN, 1989).

Os elevados atritos gerados durante a retificação podem ser considerados um fator de extrema importância para o surgimento de erros de circularidade. Um fluido de corte com boa capacidade lubrificante e refrigerante é recomendável para manter a qualidade final da peça retificada (MINKE, 1999).

2.8.3 Desgaste diametral do rebolo

O desgaste do rebolo pode ser expresso tanto pela sua perda diametral, bem como, pela redução volumétrica do mesmo. Segundo Malkin (1989), há três principais mecanismos de desgaste do rebolo que são: por atrito, pela fratura dos grãos abrasivos e do aglomerante. A relação G é definida como a relação do volume de material removido pelo volume de rebolo gasto durante o tempo de usinagem (RAMESH *et al.*, 2001).

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \tag{2.6}$$

Onde: Z_w = volume de material removido;

Z_s = volume de rebolo gasto.

Com base na equação 2.7, conclui-se que quanto maior for o desgaste do rebolo menor será a relação G. Desse modo, durante o processo de retificação, o rebolo permanece agressivo, devido à perda excessiva de grãos abrasivos da superfície de corte Em contraposição, caso a relação G seja alta haverá uma perda menor de grãos abrasivos da

superfície de corte do rebolo promovendo perda de agressividade durante a retificação. Dessa forma, o rebolo apresenta uma perda diametral menor que no caso anterior.

2.8.4 Microdureza

Os danos térmicos decorrentes do processo de retificação são uns dos principais fatores que afetam diretamente a qualidade final do produto. De acordo com Aurich *et al.,* (2008), para avaliar a integridade superficial da peça, é importante a análise de microdureza e microestrutura.

A microdureza é uma variável que reforça as afirmações que podem ser feitas através da microscopia óptica do material usinado. A retificação dos aços geralmente ocorre após o tratamento térmico destes. Durante a retificação, dependendo da temperatura gerada pelo contato entre a peça/rebolo, pode ocorrer a queima superficial na peça, provocando a retêmpera do material, originando uma microestrutura frágil, que irá prejudicar à resistência a fadiga do material. Em alguns casos, o aumento da temperatura pode provocar o revenimento da peça, quando a temperatura do processo for superior a temperatura em que o material foi revenido, causando um amolecimento do material próximo à superfície retificada. A perda de dureza superficial é um fenômeno complexo, relacionado com o revenimento da estrutura martensítica, e com a difusão de átomos de carbono, sendo dependente da temperatura e do tempo de corte do processo (MALKIN, 1989).

2.9 Análise microestrutural

A análise microestrutural do material através da técnica de caracterização por microscopia tem como objetivo obter imagens ampliadas em uma determinada superfície, possibilitando a visualização de detalhes e componentes microestruturais não visíveis a olho nu.

Segundo Padilha (2004), a análise dos componentes microestruturais com o auxílio de microscopia recebe o nome de metalografia. Para a realização da metalografia são utilizados elementos denominados reagentes, normalmente ácidos, que têm como objetivo criar micro-corrosões e assim distinguir mais facilmente os diferentes microconstituintes da amostra.

A preparação da superfície a ser analisada deve estar polida e isenta de qualquer contaminação. O excesso de rugosidade é um fator de extrema importância, pois compromete a resolução da imagem, e a presença de partículas estranhas à peça podem ocasionar resultados não conclusíveis (COLPAERT, 2008).

No processo de retificação, os danos térmicos tais como queima e super-revenimento, podem ser facilmente observados através da metalografia. Quando ocorre a retêmpera há uma mudança de fase diferente do restante do material, já quando ocorre o super-revenimento há uma mudança na coloração do material.

2.10 Fluídos de corte

Neste item são apresentados os principais assuntos abordados sobre os fluídos de corte durante este trabalho.

2.10.1 Importância das aplicações dos fluídos de corte no processo de retificação

Duas considerações importantes quando se trabalham com rebolos são a refrigeração e a lubrificação. Isso devido à grande geração de calor que prejudica a qualidade superficial e promove perdas dimensionais e geométricas na peça.

Esse calor, segundo Guo *et al*., (2003), provém do atrito entre peça e rebolo. Ele irá gerar deformações térmicas na peça, limitando a precisão da usinagem. De acordo com Irani *et al*., (2005), o dano térmico causado por grande geração de calor é um dos maiores fatores limitante no processo de retificação. Entretanto, ainda segundo Irani *et al*., (2005), este dano

pode ser reduzido pela aplicação do fluido de corte que remove o calor gerado pela interação dos grãos abrasivos do rebolo com a peça através da transferência de calor. Há também uma diminuição da geração de calor decorrente da diminuição do atrito entre peça/rebolo, pela ação lubrificante do fluido de corte, o que diminui também as forças de usinagem e a tensão residual (GUO *et al*., 2003).

Para minimizar estes problemas, é essencial a utilização dos fluídos de corte durante a operação de retificação.

2.10.2 Funções dos fluídos de corte

Segundo Wang (2008), As principais funções dos fluidos de corte são lubrificação e refrigeração, mas também outras funções podem ser oferecidas pelos fluídos tais como:

- Proteção contra corrosão;
- Redução da dilatação térmica da peça;
- Redução no custo de ferramental na operação;
- Retirada do cavaco da região de corte;
- Prevenção contra soldagem cavaco ferramenta (formação de arestas postiças);
- Evitar danos à estrutura superficial e o crescimento exagerado de tensões residuais na superfície da peça usinada.

2.10.3 Danos à saúde causados pelos fluídos de corte

Segundo Irani *et al*., (2005), os fluidos de corte são formado por substâncias tóxicas que tem a função de garantir maior vida aos mesmos. Entre elas estão dispersantes, anticorrosivos, biocidas e clorantes. Além disso, os fluídos de corte podem ser contaminados em função de poeira, água de má qualidade, fungos bactérias e outros fluidos utilizados na operação.

De acordo com Anon (2003), essas substâncias causam danos à saúde humana. As pessoas podem entrar em contato com tais substâncias por meio de contato direto com a pele, pela inalação da névoa de fluidos ou por engolir pequenas partículas. Além disso, o fluído de corte pode mudar durante as operações, deixando ele mais nocivo às pessoas que trabalham, através de produtos de reações químicas, corpúsculos estranhos e microorganismos. Devido a isso, podem ocorrer diversos problemas como pele ressecada, rachadura e irritações da pele, alergias, irritação dos olhos, distúrbios respiratórios e distúrbios gastrointestinais (SILLIMAN, 1992). Além disso, há potencialmente o efeito fatal dos metais pesados encontrados nos fluidos de corte podendo agravar mais os riscos ao sistema respiratório e digestivo.

2.10.4 Manutenção dos fluídos de corte

Segundo Catai (2004), as instruções básicas para a correta manutenção dos fluídos de corte são:

- Limpar o sistema de fluídos cuidadosamente antes de se colocar novos fluídos, atentando para a limpeza das tubulações, canalizações e reservatórios;
- Evitar o uso de madeiras e outros materiais orgânicos no sistema;
- Quando possível realizar a esterilização do sistema por meio de biocidas, ou mesmo utilizar detergentes para a remoção de incrustações ou depósitos gordurosos;
- Contar com um bom sistema de remoção de cavacos, a fim de que se evite pontos de estagnação dos mesmos, onde poderiam se instalar focos de microorganismos;

- Fazer sempre a aeração do fluido, a fim de que o crescimento no número de bactérias anaeróbicas (que se proliferam na presença de O_2), não ocorra, assim com o mau cheiro provindo das mesmas;
- Sempre prezar pela higiene do local de trabalho, evitando que o sistema de circulação de fluído seja utilizado como depósito de lixo, ou mesmo que pessoas com moléstias infecciosas operem o referido sistema.

Ainda segundo Catai (2004), além das regras básicas para a manutenção dos fluídos, também os controles do pH e concentração da água, no caso de soluções ou emulsões não podem deixar de ser realizados, pois o monitoramento destes fatores é de fundamental importância para se prolongar a vida dos fluídos, dos equipamentos utilizados, além de colaborar com a saúde dos operadores e com a qualidade final das peças.

2.10.5 Descarte dos fluídos de corte

Segundo Irani (2005), uma vez usado o fluído de corte, ele contém partículas metálicas na forma de cavacos, oriundas da peça usinada, partículas abrasivas que aparecem devido ao desgaste da ferramenta e partículas resultantes da degradação biológica, que combinada com íons ferrosos dão a emulsão um aspecto acinzentado.

2.10.6 Classificação dos fluídos de corte

Diante do elevado crescimento tecnológico mundial, existe hoje no mercado uma imensa diversidade de fluídos de corte. Porém, ainda não existe um fluído de corte que agrupe todos os diferentes requisitos exigidos para cada operação de usinagem conhecida atualmente (CATAI, 2004).

De acordo com Motta & Machado (1995), Bianchi, Aguiar, Piubeli (2004), cada tipo de fluido de corte apresenta características particulares, vantagens e limitações distintas.

Contudo, as características que distinguem as diferentes classes nem sempre são de fácil visualização, existindo pequenas diferenças quanto à classificação destes fluídos.

De acordo com Runge & Duarte (1990), Motta e Machado (1995), Machado & Silva (1999), Bianchi, Aguiar, Piubeli (2004), agrupam-se os fluidos de corte em quatro tipos básicos:

- Óleos de cortes ou fluídos de corte (mineral ou aditivado);
- Fluídos de cortes solúveis em água;
    - Emulsionáveis convencionais (óleos solúveis ou emulsionáveis);
    - Emulsionáveis semi-sintéticos;
- Soluções (fluidos sintéticos);
- Gases;
- Pastas e lubrificantes sólidos.

Webster (1995) relaciona algumas características dos quatro principais fluídos de corte: óleo mineral, óleo solúvel, fluídos semi-sintéticos e fluídos sintéticos mostrado na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização dos principais fluídos de corte (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

2.11 O método da mínima quantidade de lubrificante (MQL)

Segundo Campbell (1995), a qualidade da peça e o custo estão intimamente relacionados com a aplicação do fluído de corte. Além disso, a refrigeração e lubrificação são indispensáveis em processos que geram elevadas temperaturas, como ocorre no processo de retificação (KLOCKE, *et al*., 2000).

O método da MQL surge como uma alternativa coerente, uma vez que combina a funcionalidade da refrigeração com um consumo extremamente baixo de fluídos, até 100 ml/h a uma pressão de 4 a 6 kgf/cm^2 . Segundo Attanasio (2006) essa tecnologia reduz os problemas ambientais, os de saúde dos operadores e os originados do alto custo da usinagem. O método da MQL garante uma melhora da qualidade superficial e faz com que não haja mais a necessidade de aplicação de bactericidas nos reservatórios.

De acordo com Heisel *et al*., (1998), na aplicação do fluído de corte convencional há uma inundação intensa na superfície usinada, enquanto que nos métodos em que se empregam a MQL, o fluído é colocado em contato apenas com a área de corte definida entre ferramenta, peça e cavaco.

A MQL ocorre através da aspersão do óleo (fluído de corte) e ar comprimido na região de corte, onde geralmente o óleo faz a lubrificação e o ar comprimido a refrigeração do processo de corte. A seguir são apresentadas algumas vantagens em relação à utilização dos métodos da MQL frente à refrigeração convencional (HEISEL, *et al*., 1998).

- O volume de fluído é bem inferior ao da refrigeração convencional;
- Os lubrificantes de refrigeração não consumidos aumentam a necessidade de manutenção e problemas de despejo;
- 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 desnecessário;
- Uma grande vantagem é que a aplicação de biocidas e preservativos pode ser eliminada.

2.11.1 O método da mínima quantidade de lubrificante (MQL) com adição de água

Mesmo com o aparecimento do método da mínima quantidade de lubrificante (MQL), a busca por novas formas de aplicação do fluido de corte continuou bastante intensa. Com isso, a tendência de reduzir cada vez mais o volume de fluido nos processos de usinagem, bem como seus efeitos não pararam. Como conseqüência desenvolveu-se um novo método que envolve a adição de água no método da MQL.

Recentemente o método que envolve a adição de água no método MQL foi desenvolvido por dois pesquisadores que estudaram seus efeitos em processos de usinagem com geometria da ferramenta definida como: torneamento e fresamento.

De acordo com Itogawa *et al.,* (2006), esse novo método apresenta extrema capacidade de resfriamento devido às gotículas de água envoltas pela camada de óleo (Figura 2.11) que evaporam facilmente nas superfícies da ferramenta e da peça e refrigeram-nas devido a sua sensibilidade e latência ao calor.

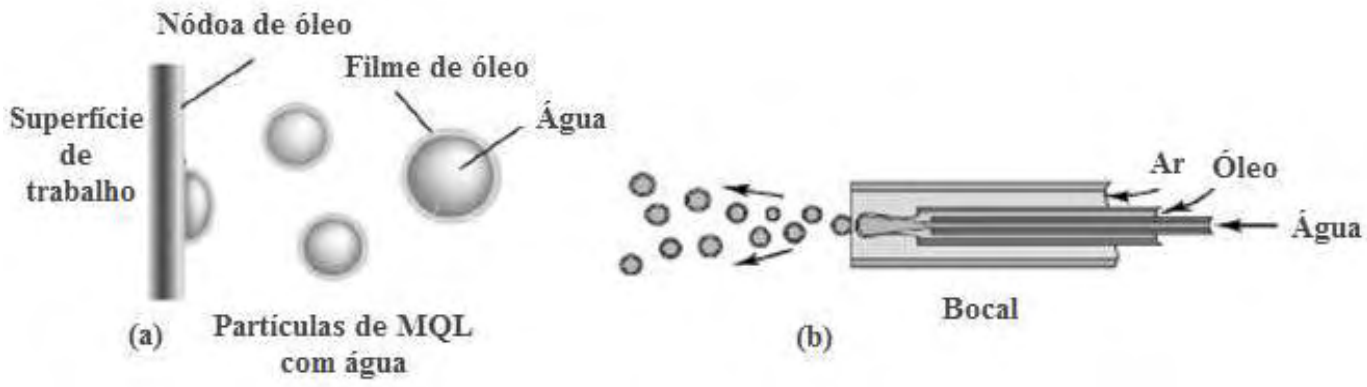


Figura 2.11 Conceito das gotículas de água em óleo (ITOGAWA, *et al*., 2006)

Essa alta capacidade de resfriamento é importante tanto para a exatidão dimensional, geométrica e da rugosidade superficial como para outros fenômenos envolvidos entre a ferramenta e a superfície de usinagem. Itogawa *et al*., (2006) afirma que o método de MQL com adição de água melhora o efeito de lubrificação em relação ao método de MQL tradicional, proporcionando a redução do coeficiente de atrito entre peça/rebolo.

Na utilização da MQL com adição de água, a magnitude das forças axial de corte é muito pequena comparada com a obtida pelo método tradicional da MQL.

Yoshimura *et al*., (2005) conclui, portanto, que o sistema de MQL com água é mais eficiente do que o sistema de mínima quantidade de lubrificante tradicional. Além da redução das forças de usinagem, bem como redução do desgaste da ferramenta, a MQL com água mostra-se também mais eficiente na supressão da expansão térmica, tornado essa técnica mais vantajosa em relação à MQL tradicional.

É importante ressaltar que os resultados e conclusões obtidos pelos autores citados referem-se ao estudo da MQL com adição de água nos processos de usinagem com geometria definida. Com relação a essa recente técnica, poucos trabalhos foram publicados na literatura formal e nenhum deles refere-se ao processo de usinagem com geometria da ferramenta indefinida como a retificação.

2.12 Empastamento das porosidades do rebolo

Durante o processo de retificação, quando a energia gerada na interface peça/rebolo gera um aumento da temperatura, ocorre uma maior tendência de aderência de partículas metálicas nos poros do rebolo (WANG, *et al*., 2000). Com isso, ocorrerá uma elevação ainda maior de temperatura, causando danos térmicos às peças, além de piorar o acabamento superficial e aumentar o desgaste do rebolo. Quando utiliza-se a técnica de MQL no processo de retificação, os cavacos gerados durante a usinagem misturam-se ao óleo utilizado no

sistema de MQL, formando uma pasta de fluído que aloja-se nos poros do rebolo, dificultando ainda mais a limpeza da superfície do rebolo (CAMERON, *et. al*., 2010). Essa pasta de fluído afeta diretamente a qualidade superficial das peças e o desgaste da ferramenta abrasiva.

De acordo com Sinot *et al*., (2006), há duas maneiras de evitar o empastamento do rebolo: utilizar um rebolo com estrutura aberta, o que pode aumentar a probabilidade da fratura do ligante; ou redressá-lo, o que aumenta o custo do processo e diminui a vida da ferramenta. A figura 2.12 mostra a imagem obtida através de um microscópio óptico (ampliação 100X) do empastamento das porosidades do rebolo. Pode-se observar também a coloração acinzentada na superfície de corte do rebolo.

Figura 2.12. Rebolo empastado com cavacos aderidos (aumento de 100X)

2.12.1 O sistema de limpeza de rebolos através da aplicação de jatos de ar comprimido

Diante de poucos sistemas que promovem a limpeza da superfície de corte do rebolo existente no mercado, neste item será apresentado apenas o sistema de limpeza de rebolos através da aplicação de jatos de ar comprimido, o qual foi utilizado durante este trabalho.

Segundo o estudo realizado por Lee *et al.,* (2002), na retificação de canais em peças, o jato de ar comprimido incidente na superfície de corte do rebolo é uma alternativa para impedir o fenômeno do empastamento do rebolo. O jato de ar comprimido incide na superfície do rebolo e retira boa parte das impurezas que são formadas pela mistura do óleo utilizado no sistema MQL e cavacos obtidos durante a usinagem que aderiram à ferramenta.

Dessa forma, quanto menor for a pressão do ar, menor será o efeito de limpeza da superfície do rebolo. A figura 2.13 apresenta o efeito do jato de ar comprimido superfície do rebolo (a) retificação sem limpeza de rebolos e (b) retificação com limpeza de rebolos.

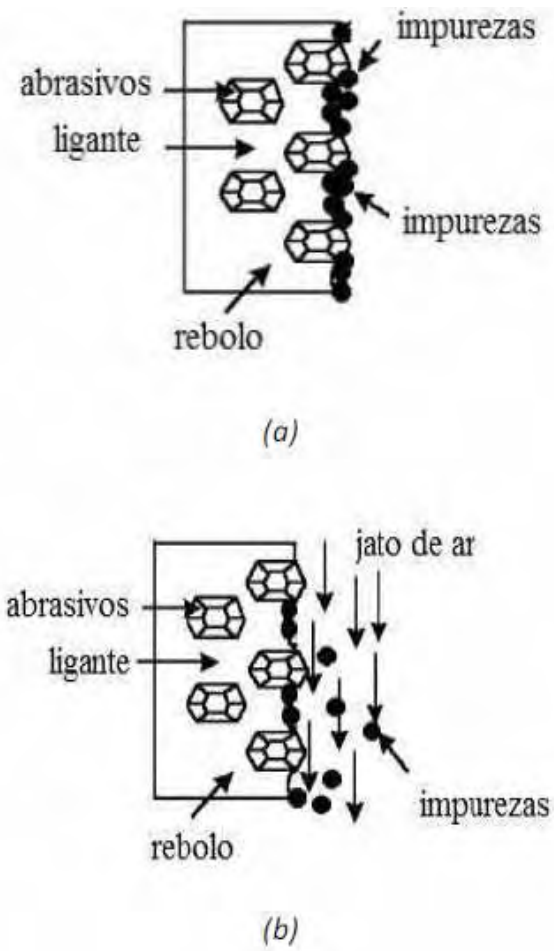


Figura 2.13. Efeito do jato de ar comprimido na superfície do rebolo (a) retificação sem limpeza do rebolo e (b) retificação com limpeza de rebolo (LEE *et al*., 2002, Adaptada).

Segundo Lee *et al*., (2002), é conseguido um aumento na profundidade de corte decorrente da diminuição do desgaste da ferramenta. Já com relação à qualidade superficial, há uma diminuição nos valores de rugosidade com a utilização de jatos de ar comprimido na limpeza da superfície de corte do rebolo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item são descritos os materiais e equipamentos utilizados durante os ensaios, assim como os procedimentos e parâmetros de entrada adotados durante este trabalho para realizar as medições das variáveis de saída: rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo, tensão residual e microdureza, além da verificação da integridade superficial através das análises de microestrutura.

A retificação dos corpos-de-prova foi realizada no Laboratório de Usinagem por Abrasão da Faculdade de Engenharia – UNESP – campus de Bauru. Após a retificação, foram obtidos os resultados de rugosidade, circularidade e desgaste diametral do rebolo, analisados no Laboratório da UNESP campus de Bauru. As análises de microestrutura e microdureza foram realizadas no Laboratório de Materiais da empresa INA do grupo Schaeffler na planta localizada em Sorocaba. As análises de tensões residuais foram realizadas no Laboratório de Metrologia da empresa MAHLE Metal Leve S.A.

3.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Retificadora cilíndrica externa de mergulho

Para a retificação dos corpos-de-prova, foi utilizada uma retificadora cilíndrica externa fabricada pela empresa SULMECÂNICA, modelo RUAP 515H equipada com um CNC da Fagor.

3.1.2 Corpos-de-prova

Durante os ensaios foram utilizados como corpos-de-prova o aço ABNT 4340 temperado e revenido com dimensões de 54 mm (diâmetro externo), 30 mm (diâmetro interno) e 5 mm de espessura. Este aço depois de temperado e revenido apresenta dureza de aproximadamente 54 ± 2 HR_c. A tabela 2 mostra a composição química deste aço.

Tabela 2. Composição química do aço ABNT 4340 (CALLISTER, 2007)

Composição Química (%)							
C	*Si*	*Mn*	*P*	*S*	*Cr*	*Mo*	*Ni*
0,37 – 0,43	*0,15 – 0,35*	*0,60 – 0,80*	*0,025*	*0,025*	*0,70 – 0,90*	*0,20 - 0,30*	*1,65 – 2,00*

3.1.3 Ferramenta abrasiva

Durante os ensaios foi utilizado como ferramenta abrasiva um rebolo superabrasivo de CBN, especificação SNB151Q12VR2 14A1, liga vitrificada, dureza da liga Q12 e granulometria 80, com dimensões de 350 mm (diâmetro externo), 127 mm (diâmetro interno), 15 mm (largura) e 5 mm (camada de CBN), fabricado pela empresa Nikkon Ferramentas de Corte Ltda.

3.1.4 Fluído de corte

Utilizaram-se dois tipos de fluido lubri-refrigerantes sendo que:

- Para a técnica da (MQL), foi utilizado o óleo de corte integral Rocol Cleancut fabricado pela empresa ITW Chemical Products, diluído em água nas proporções 1:1, 1:3 e 1:5, conforme especificado pelo fabricante.

- Para a técnica convencional de lubri-refrigeração, foi utilizada uma emulsão com concentração de 2,5 % de óleo em água do óleo semi-sintético QUIMATIC ME-I concentrado. Deve-se ressaltar que conforme especificação do fabricante, a concentração de óleo em água pode variar de 2,5 a 5%. A medição da concentração foi realizada através de um refratômetro modelo N-1E do fabricante ATAGO.

3.1.5 Dressador

Para a dressagem do rebolo superabrasivo de CBN, foi utilizado um dressador estático do tipo conglomerado com dimensões da pastilha de 15 mm (largura) x 10 mm (altura) x 8 mm (espessura), fabricado pela empresa Master Diamond Ltda.

É importante ressaltar que a dressagem do rebolo superabrasivo de CBN, foi realizada de forma manual, devido às limitações na máquina retificadora que não possui um sistema de dressagem automática que permite a utilização de dressadores do tipo rotativo que é mais indicado para rebolos de CBN. Ainda para a dressagem do rebolo, foi utilizada a técnica de lubri-refrigeração convencional para evitar o desgaste excessivo do dressador. As condições de dressagem do rebolo superabrasivo de CBN: profundidade de dressagem "a_{ed}" de 0,04 mm e avanço de dressagem "f_{ad}" de 600 mm/min foram mantidos constantes para todos os ensaios, sendo realizada no final de cada ensaio para que não viessem a influenciar nos resultados das variáveis de saída analisadas durante este trabalho.

3.1.6 A técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL)

A técnica da (MQL) é composta basicamente por: compressor de ar, regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador e bocal projetado para a utilização da MQL na retificação. Este equipamento permite uma fina regulagem do volume lubrificante/ar separadamente por meio de uma válvula do tipo agulha em um fluxo de ar a pressão constante de aproximadamente 7 kgf/cm^2.

A vazão de óleo no sistema MQL foi de 100 ml/h. A medição de vazão do óleo foi realizada utilizando-se uma proveta graduada para coletar e medir o volume de óleo expelido em determinado intervalo de tempo. O controle das vazões do óleo e do ar foi realizado por registros do tipo agulha existente no interior do equipamento.

Para a medição precisa das vazões de ar comprimido utilizadas durante os ensaios na técnica da MQL, é necessário um medidor de vazão e um regulador de pressão com filtro conforme figura 3.1. O medidor de vazão foi conectado na rede de ar comprimido, fornecendo a leitura direta da vazão em m^3/h, cuja característica construtiva foi do tipo turbina, onde o campo magnético, de acordo com a rotação da turbina, é mais ou menos intenso, sendo tal captado por um sensor posicionado próximo a turbina do medidor.

A vazão do ar na técnica MQL era de aproximadamente 30 m^3/h (480 l/min).

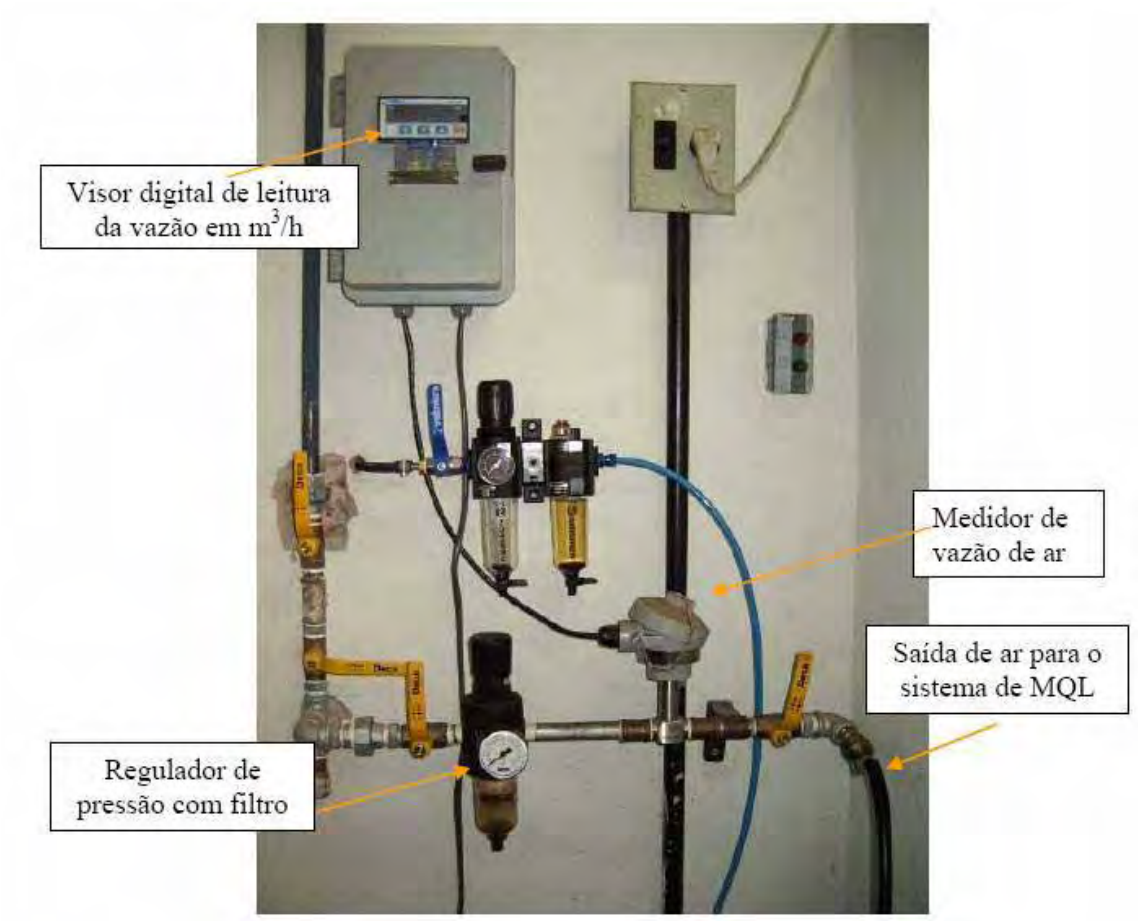


Figura 3.1 Filtro de linha utilizado durante os ensaios na técnica da MQL

Na figura 3.2, encontra-se o bocal projetado com dimensões e formas próximas ao desenvolvido por Silva *et al.,* (2007) para a utilização da técnica da MQL. O bocal foi fabricado em latão e possui várias entradas de ar através de furos externos. Estes furos externos estão conectados a mangueiras independentes externas. Possui (duas) entradas de

fluido de corte através de dois furos internos que recebe fluído de duas mangueiras independentes passadas internamente pela mangueira de ar comprimido. A figura 3.3, mostra o bocal desenvolvido e utilizado durante os ensaios na utilização da técnica da MQL no processo de retificação. Ressalta-se que diferente de alguns trabalhos já realizados, o bocal projetado possui geometria retangular e com maior área de atuação da superfície retificada.

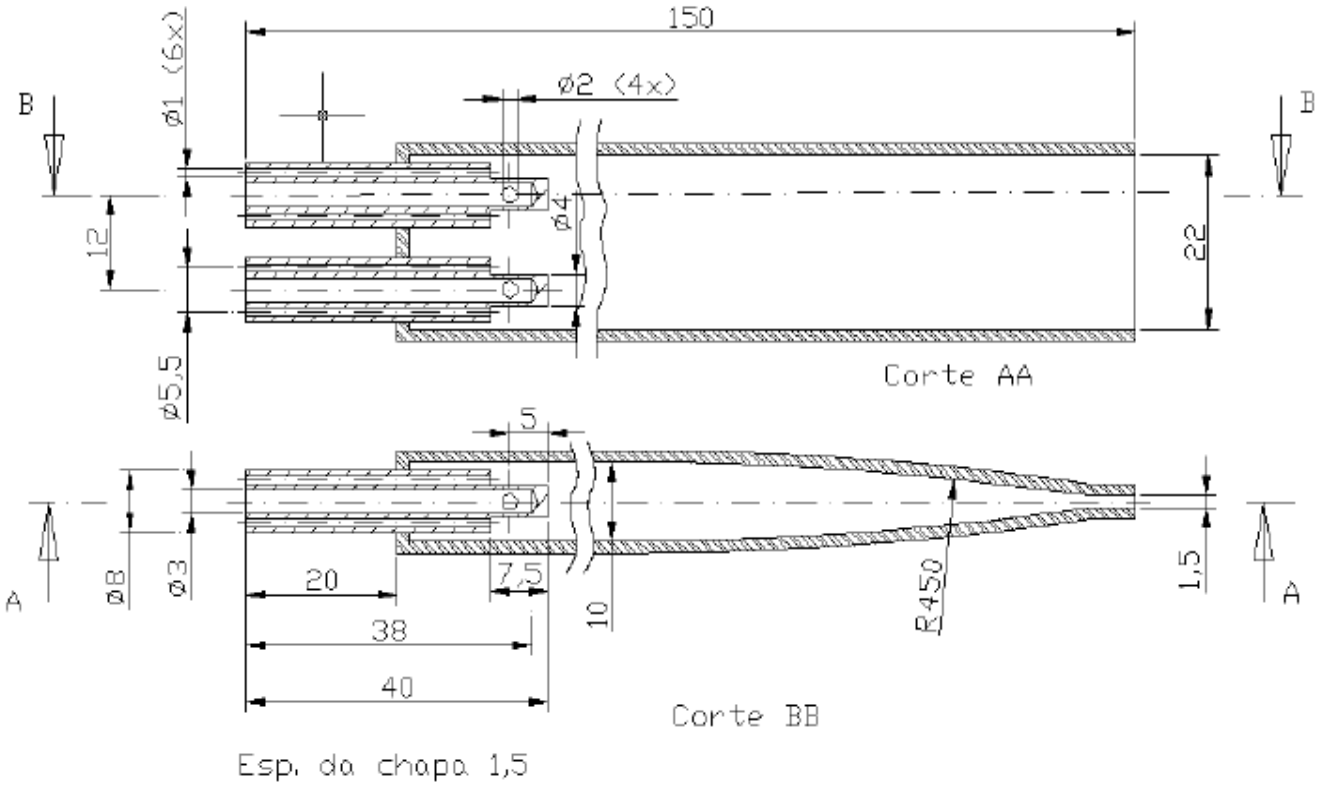


Figura 3.2 Projeto do bocal para utilização da técnica da MQL no processo de retificação

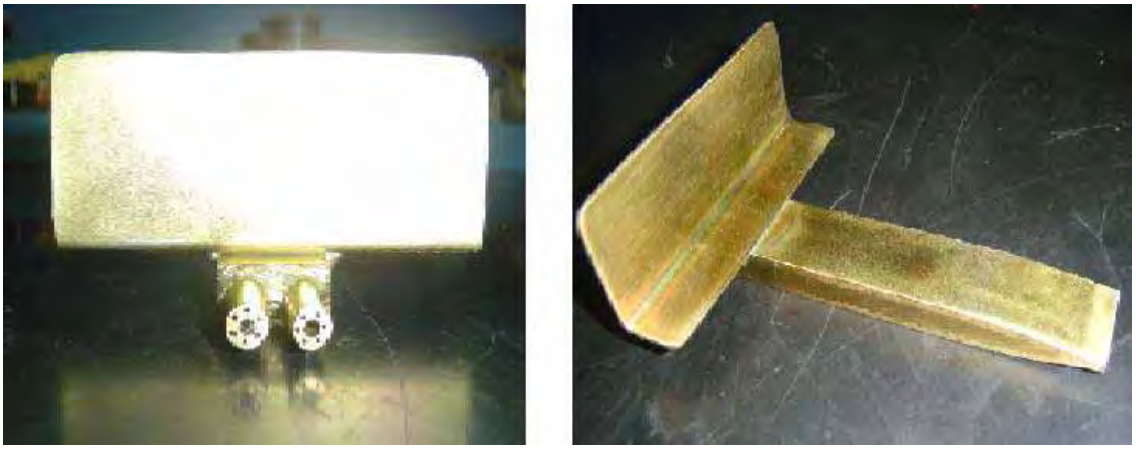


Figura 3.3 Bocal utilizado durante os ensaios na técnica da MQL

3.1.7 A técnica convencional de lubri-refrigeração

A técnica convencional de lubri-refrigeração é a mesma utilizada pelas indústrias, sendo caracterizada pela aplicação do fluído de corte a baixa pressão e com uma alta vazão. A vazão do fluído de corte foi medida através de um medidor tipo turbina, o qual foi possível obter o valor de 17 l/min. Esta vazão foi a máxima alcançada pela bomba de sucção utilizada durante os ensaios. A técnica convencional de lubri-refrigeração consiste de mangueiras, bocais aplicadores, reservatório do fluído e bomba de sucção. Ressalta-se que o reservatório do fluído utilizado possui uma capacidade de 80 litros.

O bocal utilizado na técnica convencional de lubri-refrigeração consiste de quatro bicos difusores de aplicação do fluído com dimensões de Ø 6,3 mm. A figura 3.4 mostra este tipo de bocal, utilizado durante os ensaios.

Figura 3.4 Bocal convencional utilizado durante os ensaios

3.1.8 O método de limpeza da superfície do rebolo

O método de limpeza da superfície de corte do rebolo é independente da técnica da MQL. Este método é composto por: compressor de ar comprimido, medidor de vazão, medidor de pressão e bocal de limpeza.

Para a aplicação do ar comprimido usado na limpeza da superfície de corte do rebolo, foi projetado um bocal com um sistema de fixação que permitia o posicionamento do jato de

ar em diferentes ângulos de incidência sendo: 30, 60 e 90°. Deve se ressaltar que durante os ensaios foi mantido constante o ângulo de incidência de 30°. Optou-se por utilizar esse ângulo, pois, dentre os ângulos de incidência analisados no trabalho desenvolvido por Oliveira (2011), foi o que obteve os melhores resultados das variáveis de saída. A geometria do bocal, seu sistema de fixação e posicionamento são mostrados nas figuras 3.5, 3.6 e 3.7 respectivamente.

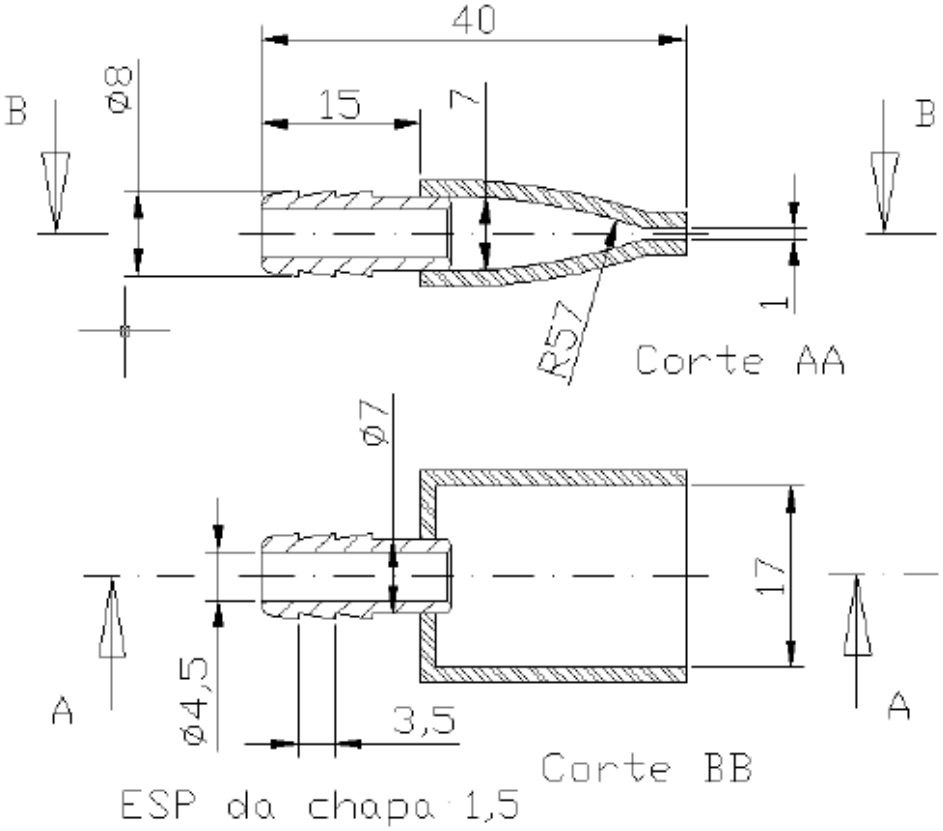


Figura 3.5 Bocal utilizado para a limpeza da superfície do rebolo

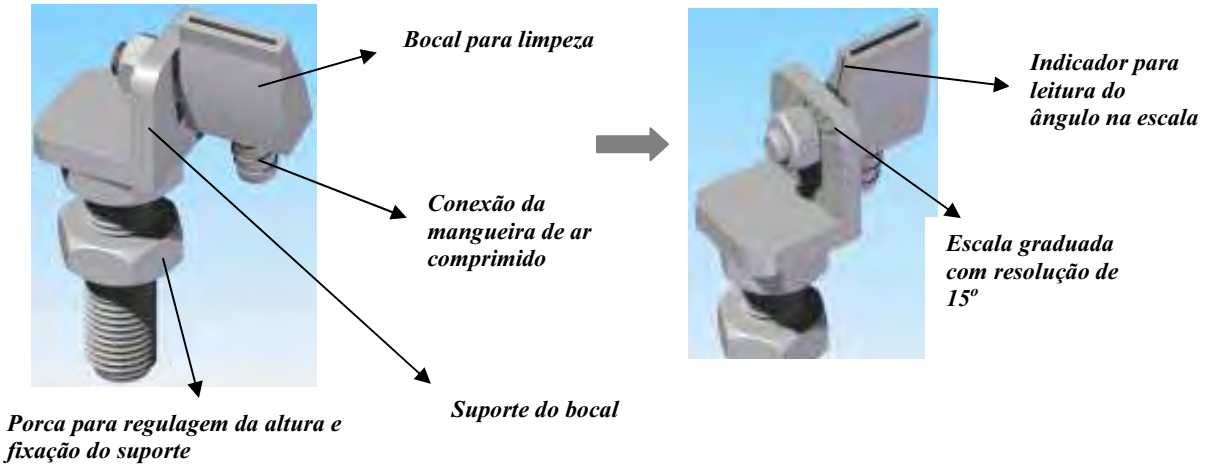


Figura 3.6 Demonstração das partes funcionais do bocal de limpeza da superfície do rebolo

O bocal de limpeza foi fixado a uma distância de aproximadamente 0,5 mm da superfície de corte do rebolo. A figura 3.7 mostra a fixação do bocal de limpeza da superfície de corte do rebolo.

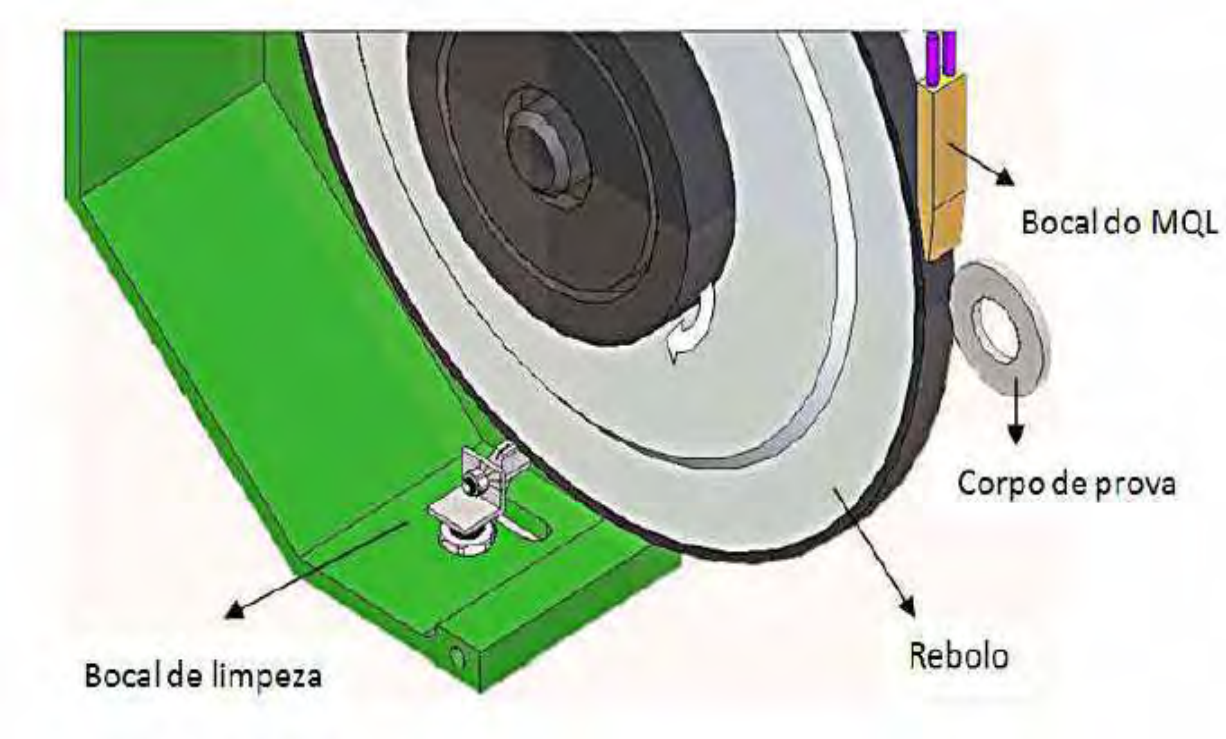


Figura 3.7 Fixação do bocal de limpeza da superfície de corte do rebolo na retificadora

Durante os ensaios com o método de limpeza, o ar era expelido contra a superfície de corte do rebolo a uma vazão de 30 m^3/h (480 l/min) e pressão de 7 kg/cm^2 constante. Deve-se ressaltar que esses valores foram os valores máximos obtidos devido às limitações do equipamento.

3.2 Metodologia utilizada durante os ensaios

Inicialmente é importante salientar que devido a algumas limitações da máquina retificadora, como por exemplo, baixa rotação do rebolo, optou-se por realizar ensaios preliminares para definir as melhores condições de usinagem com o objetivo de utilizar nos ensaios futuros. Para alguns parâmetros os valores utilizados não são ideais, porém são os valores máximos alcançados pela retificadora utilizada.

O presente trabalho constituiu de 15 ensaios, utilizando a aplicação de cinco técnicas de lubri-refrigeração e um método de limpeza da superfície de corte do rebolo em três velocidades de avanço distintas sendo:

- ✓ MQL tradicional (sem adição de água + sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com ângulo de incidência de 30°);
- ✓ MQL com adição de água (nas proporções 1:1, 1:3 e 1:5 partes de óleo/partes de água + sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com ângulo de incidência de 30°);
- ✓ Convencional (fluído em abundância).

As velocidades de avanço v_f utilizadas foram: 0,25; 0,50 e 0.75 mm/min.

Foram retificadas três peças em cada ensaio totalizando um volume de material removido de 3900 mm^3. Para a análise das variáveis de saída foram realizadas duas repetibilidades em cada ensaio. Antes de cada ensaio o rebolo foi dressado para que não viesse a influenciar nos resultados.

Os parâmetros de entrada utilizados durante os ensaios foram mantidos constante sendo:

- ✓ Velocidade de corte do rebolo v_s de 30 m/s (considerado baixa para o rebolo de CBN, limitado pela retificadora);
- ✓ Sobremetal removido a cada ciclo 0,1 mm;
- ✓ Tempo de centelhamento t_{so} igual a 8 segundos;
- ✓ Largura de retificação 4 mm;
- ✓ Vazão do fluído de corte no método de lubri-refrigeração convencional de 17 l/min;
- ✓ Vazão do fluído de corte no método de lubri-refrigeração MQL de 100 ml/h;
- ✓ Pressão de ar no método de lubri-refrigeração MQL de 7 kgf/cm^2;
- ✓ Velocidade de saída do ar de 30 m/s no bocal;
- ✓ Pressão do sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo 7 kgf/cm^2.
- ✓ Vazão do ar no sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo 480 l/min;
- ✓ Profundidade de dressagem a_d de 0,04 mm;
- ✓ Velocidade de dressagem v_d de 600 mm/min (realizada manualmente, marcando-se o tempo até percorrer a determinada distância);

Através dos parâmetros acima utilizados, foi possível obter os parâmetros de retificação conforme mostra a tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de retificação obtidos durante os ensaios

d_e (mm)	v_f (mm/min)	a (µm)	l_c (mm)	Q_w min (mm³/min)	Q_w max (mm³/min)	Q'_w min (mm³/mm.min)	Q'_w max (mm³/mm.min)	h_{eq} min (µm)	h_{eq} max (µm)
357	0,25	1,23	0,66	157	170	39	42	0,022	0,024
357	0,5	2,45	0,93	314	339	79	85	0,044	0,047
357	0,75	3,68	1,14	471	509	118	127	0,065	0,071

A figura 3.8 mostra a matriz de ensaios utilizada durante os ensaios.

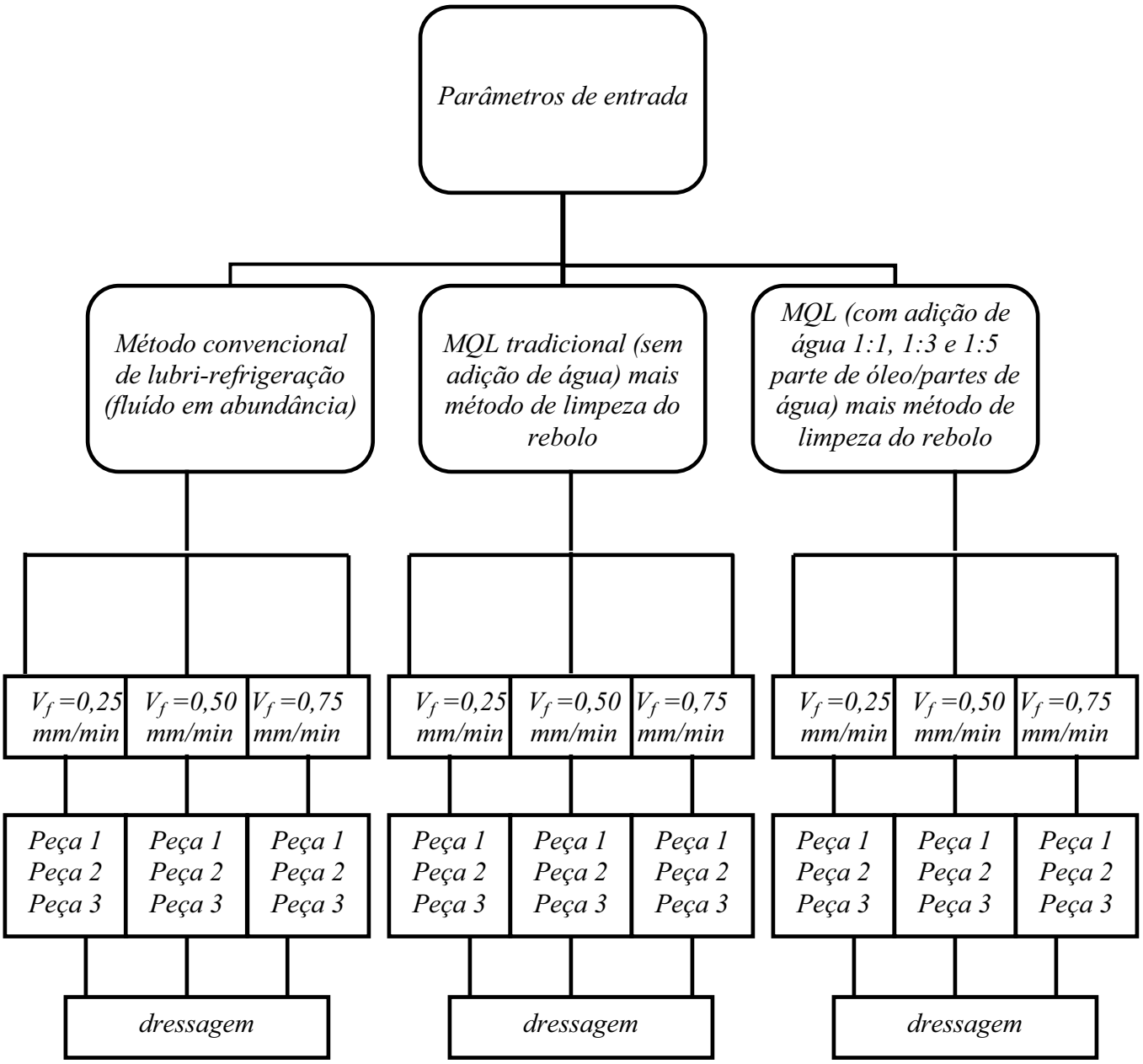


Figura 3.8 Matriz de ensaios utilizada durante os ensaios

3.3 Medição das variáveis de saída do processo de retificação

Neste item são apresentados os equipamentos e procedimentos utilizados durante os ensaios para a medição das variáveis de saída: rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo, tensão residual e microdureza.

3.3.1 Rugosidade

Para a análise da rugosidade das peças, foi utilizado um rugosímetro da marca Taylor Hobson modelo Surtronic 3+. Antes das medições, o rugosímetro foi calibrado e os corpos-de-prova foram limpos com querosene, aguarrás e álcool metílico para que resíduos de óleo não viessem a influenciar nos resultados.

O comprimento de medição (*cut-off*) utilizado foi de 0,8 mm e o filtro foi o 2CR-fase corrigida. Ressalta-se que o parâmetro utilizado durante os ensaios foi o R_a. A figura 3.9 mostra a medição da rugosidade de uma peça durante os ensaios.

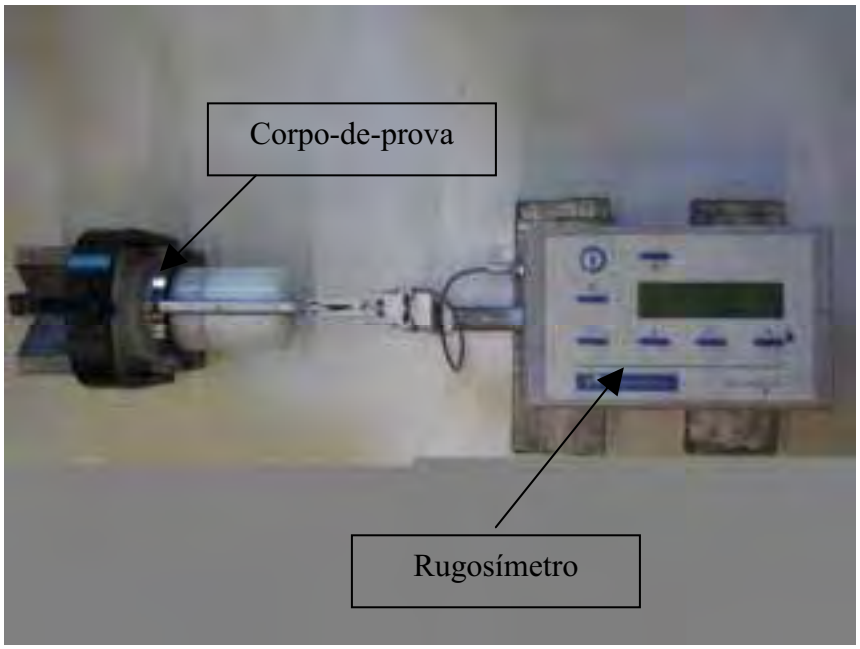


Figura 3.9 Medição da rugosidade de uma peça durante os ensaios

3.3.2 Circularidade

Para a medição dos desvios de circularidade das peças, foi utilizado um circularímetro da marca Taylor Hobson modelo Talyrond 31. A figura 3.10 mostra a medição dos desvios de circularidade de uma peça durante os ensaios.

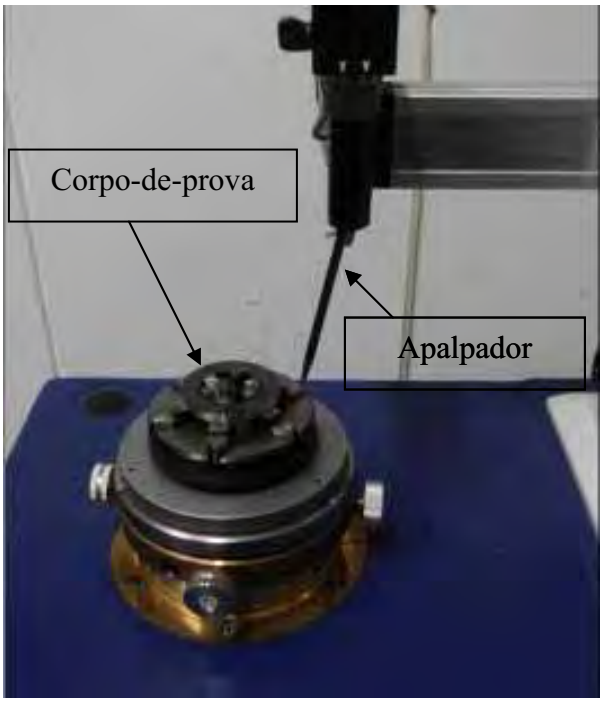


Figura 3.10 Medição dos desvios de circularidade de uma peça durante os ensaios

3.3.3 Desgaste diametral do rebolo

A avaliação do desgaste diametral do rebolo foi realizada no final de cada ensaio, onde todas as peças foram retificadas sob as mesmas condições de usinagem, pela marcação do perfil do rebolo em um tarugo de aço ABNT 1020 com dimensões de 25 mm (diâmetro) e 80 mm (comprimento). Após realizar a marcação do perfil do rebolo, efetuou-se a medição do desgaste diametral com o rugosímetro da marca Taylor Hobson modelo Surtronic 3+, o mesmo utilizado no item 3.3.1.

3.3.4 Tensão Residual

Para a análise de tensão residual, que reflete o estado de tensão em que se encontra a peça, foi utilizado durante os ensaios um aparelho digital através de ruído de Barkhausen da marca American Stress Technologies modelo Rollscan 200 – 1. Antes das análises os corpos-de-prova foram desmagnetizados para que não viesse a influenciar nos resultados. Ressalta-se que foram analisadas 15 peças onde foram realizadas à média dos valores de cada ensaio, ao longo do diâmetro externo retificado.

Figura 3.11 Aparelho ROLSCAN 200 - 1 utilizado durante os ensaios

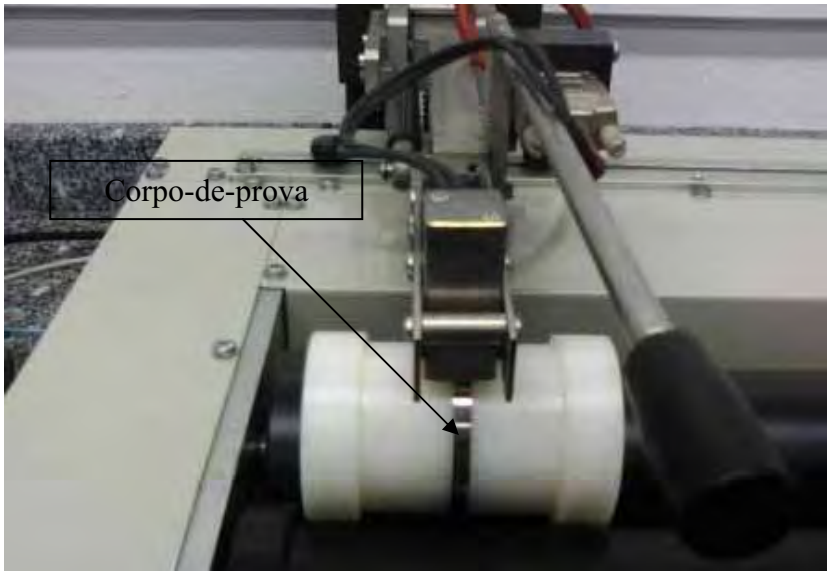


Figura 3.12 Medição da tensão residual de uma peça durante os ensaios

3.3.5 Microdureza

Para as análises de microdureza foi utilizado durante os ensaios um microdurômetro da marca LECO modelo MHT – séries 200, instalado no Laboratório de Materiais da empresa INA do grupo Schaeffler. Foram analisadas 8 (oito) profundidades sendo: 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 160 μm abaixo da superfície retificada, utilizando uma carga de 0,2 kgf.

3.4 Análise de microestrutura

As análises de microestrutura foram realizadas através de um microscópio óptico da marca Olympus, modelo 3+. Ressalta-se que foram analisados 15 corpos-de-prova. Antes das análises, os corpos-de-prova foram preparados por processo de metalografia, onde os mesmos foram cortados, embutidos, lixados, polidos e atacados quimicamente por uma solução de álcool e ácido nítrico de 2% comercialmente conhecido como Nital usado para revelar a microestrutura de aços.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são descritos os resultados obtidos para as variáveis de saída analisadas durante este trabalho, assim como para as análises de microestrutura.

Para as variáveis analisadas, mediante a construção de gráficos de barras, calcularam-se os respectivos desvios padrões que foram plotados juntamente com os valores médios reais das duas repetições executadas, exceto para as análises de tensão residual e microdureza. É importante salientar que foi realizada uma análise estatística (ANOVA) dos resultados obtidos para constatar diferenças significativas entre as médias. O software estatístico Minitab 16 foi utilizado para realizar as análises estatísticas.

4.1 Rugosidade

Na figura 4.1 são apresentados os valores de rugosidade média R_a (µm) obtidos durante os ensaios.

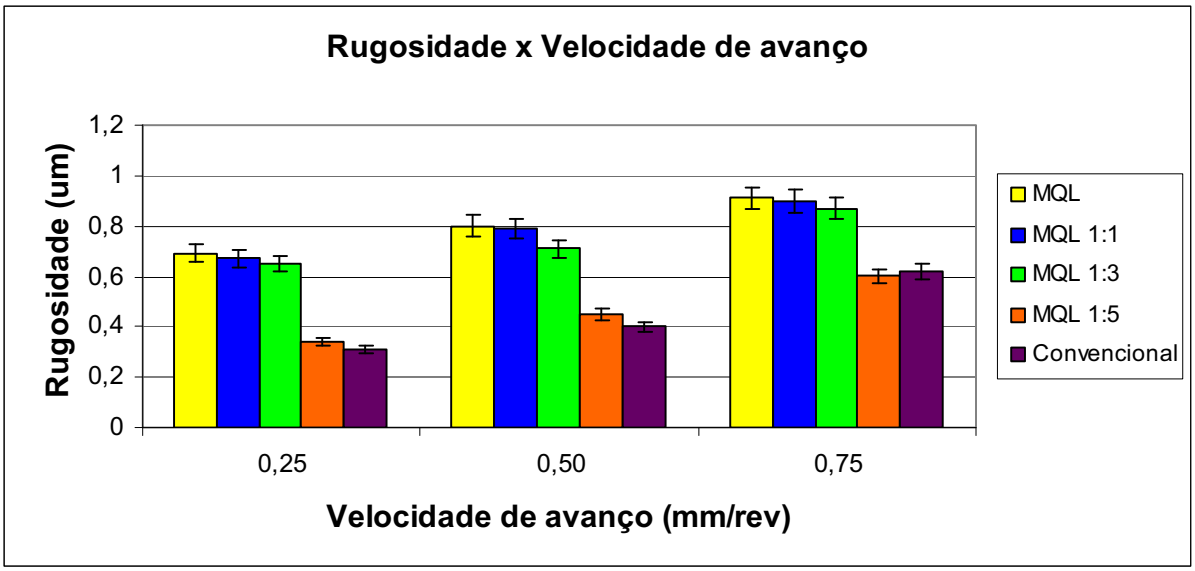


Figura 4.1 Valores de rugosidade obtidos durante os ensaios

Analisando-se os resultados da figura 4.1, pode-se observar que à medida que adiciona-se água na composição do fluído utilizando a técnica da MQL tradicional, há uma tendência na diminuição dos valores rugosidade, conseqüentemente um melhor acabamento superficial da peça. Já a técnica da MQL tradicional apresentou os maiores valores de rugosidade comparados as outras técnicas de lubri-refrigeração empregadas. Deve-se ressaltar que na técnica da MQL tradicional é utilizado apenas óleo como fluído (sem adição de água). De uma maneira geral nota-se que os valores de rugosidade diminuem com a quantidade de água adicionada no fluído. Com isso, dentre as proporções de água utilizadas na diluição do fluído, a que obteve os menores valores de rugosidade média foi a de 1:5 (parte de óleo/partes de água), chegando a valores muito próximos para os ensaios com a técnica de lubri-refrigeração convencional, que apresenta uma maior quantidade de água na composição do fluído (cerca de 97,5%).

As causas dessas variações podem ser explicadas devido ao fato de que o aumento da quantidade de água no fluído utilizando a técnica da MQL tradicional proporciona um maior fluxo do fluído na região de contato peça/rebolo, o que melhora a retirada dos cavacos da região de corte, ocasionando uma melhor lubrificação, diminuindo o atrito entre peça/rebolo.

Ao analisar a técnica da MQL tradicional, observa-se a formação de uma pasta de fluído (borra) com cavacos de difícil remoção, que mesmo com jatos de ar comprimido utilizado na limpeza da superfície de corte do rebolo, tem dificuldades de retirar. Este cavaco permanece na região de corte, afetando significativamente os valores de rugosidade da peça (CAMERON *et al.,* 2010). A adição de água na técnica da MQL tradicional ameniza esse problema, proporcionando melhores valores de rugosidade da peça, assim como uma lubri-refrigeração mais limpa causando menos impacto ambiental.

A melhora da lubrificação garante a diminuição da geração de calor decorrente da diminuição do atrito entre peça/rebolo.

Analisando a figura 4.1, observa-se também que há uma tendência no aumento dos valores de rugosidade à medida que aumenta a velocidade de avanço. Isso ocorre, pois quanto maior o avanço, maior o tamanho dos cavacos removidos, aumentando a dificuldade em retirá-los da zona de corte, ocasionando esse aumento de rugosidade (MALKIN, 1989).

Através da análise estatística (ANOVA), foi possível constatar que houve diferenças significativas, portanto, pode-se concluir que todas as técnicas de lubri-refrigeração utilizadas exercem influência significativa sobre a rugosidade das peças.

4.2 Circularidade

Na figura 4.2, são apresentados os valores dos desvios de circularidade obtidos durante os ensaios.

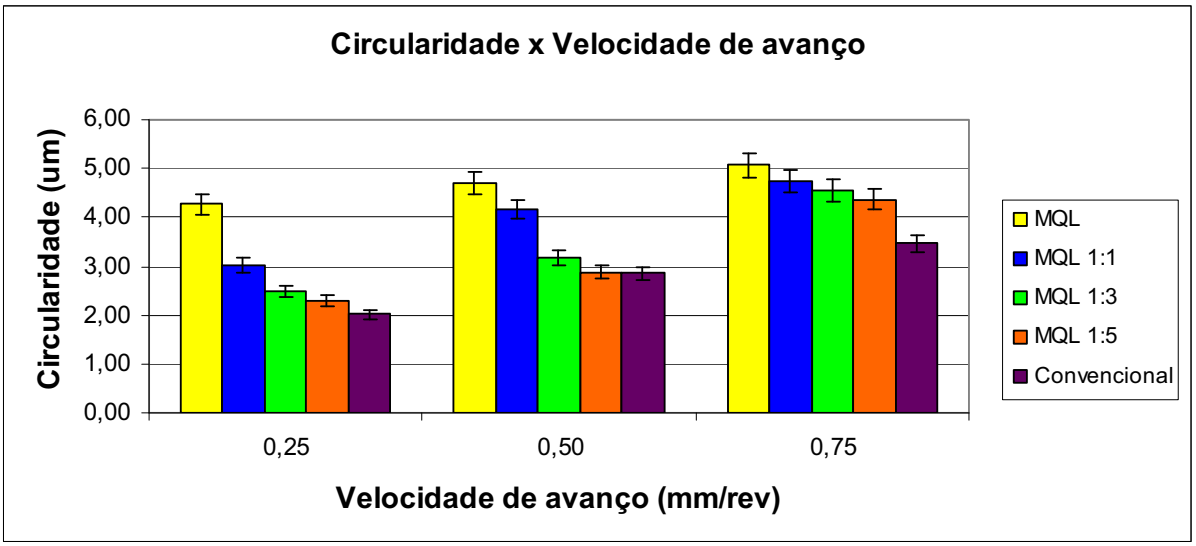


Figura 4.2 Valores dos desvios de circularidade obtidos durante os ensaios

Analisando-se os resultados da figura 4.2, pode-se observar que houve uma tendência na diminuição dos valores dos desvios de circularidade à medida que aumenta a proporção de água no fluído utilizando a técnica da MQL tradicional. Já os maiores valores dos desvios de circularidade foram obtidos com a aplicação do fluído pela técnica da MQL tradicional. Isso se deve ao fato desta técnica utilizar somente óleo como fluído, não promovendo uma boa

refrigeração da região de corte entre a peça/rebolo. Os menores valores dos desvios de circularidade foram obtidos com a aplicação do fluído pela técnica convencional, onde normalmente se utiliza uma maior quantidade de água no fluído (cerca de 97,5% de água). No geral, a emulsão utilizada na técnica convencional apresenta como característica básica sua eficaz retirada de calor da peça.

Pode-se observar que a adição de água no fluído utilizando a técnica da MQL tradicional promove um maior efeito refrigerante da região de contato entre a peça/rebolo. Observa-se que a adição de água no fluído de corte na proporção 1:5 (parte de óleo/partes de água), nos ensaios com as velocidades de avanço de 0,25 e 0,50 mm/min, os valores dos desvios de circularidade foram bem próximos aos valores obtidos com a técnica de aplicação do fluído convencional. Minke (1999) salienta que os elevados atritos assim como o calor gerado durante o processo de retificação é um fator de extrema importância para o surgimento de erros de circularidade nas peças. Itogawa *et al.,* (2006), ressalta que o aumento da proporção de água no fluído, permite um maior fluxo do fluido, melhorando a retirada dos cavacos da região de corte, ainda a técnica apresenta extrema capacidade de resfriamento devido às gotículas de água envoltas pela camada de óleo. Essa alta capacidade de resfriamento é importante para a exatidão dimensional e geométrica como para outros fenômenos envolvidos entre a ferramenta e a superfície de usinagem.

Através da análise estatística (ANOVA), foi possível constatar que houve diferenças significativas, portanto, pode-se concluir que todas as técnicas de lubri-refrigeração utilizadas durante os ensaios exercem influência significativa sobre a circularidade das peças.

4.3 Desgaste diametral

Na figura 4.3 são apresentados os resultados do desgaste diametral do rebolo obtidos durante os ensaios.

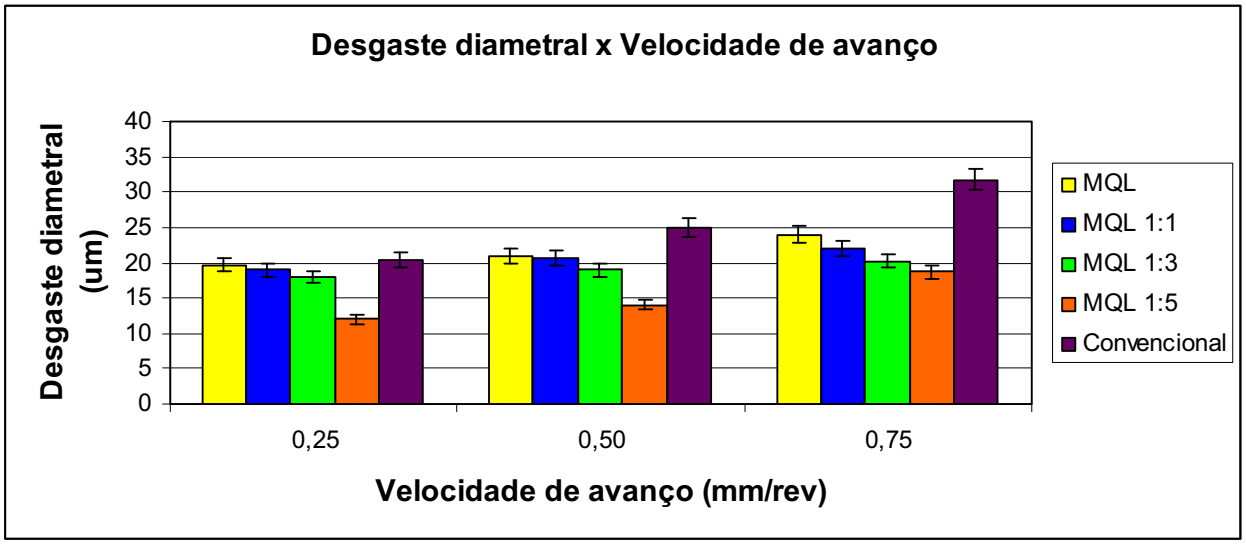


Figura 4.3 Resultados do desgaste diametral do rebolo obtidos durante os ensaios

Devido às limitações construtivas da máquina retificadora, é importante ressaltar que a velocidade periférica do rebolo de corte obtida durante os ensaios foi de 30 m/s. As velocidades de corte consideradas baixas para o rebolo de CBN encontram-se na faixa entre 40 a 80 m/s, porém, em geral sua aplicação ocorre em velocidades superiores a 100 m/s. (OLIVEIRA, *et al.,* 2009). Ainda em baixas velocidades de corte, o desempenho do rebolo de CBN é inferior, já que em maiores velocidades de corte sua dureza dinâmica é maior.

Na figura 4.3 observa-se que houve uma tendência na diminuição dos valores do desgaste diametral do rebolo à medida que aumenta a proporção de água no fluído quando utiliza-se o método da MQL tradicional. Já o método convencional de lubri-refrigeração apresentou os maiores valores do desgaste diametral do rebolo, para todas as condições de usinagem. É possível notar que a aplicação da técnica da MQL com adição de água mostrou-se superior quando comparado com a aplicação do fluído de corte pelo método convencional, possivelmente por sua boa capacidade de lubrificação da região de contato entre peça/rebolo. A adição de água no método da MQL tradicional melhora a lubrificação da região de corte reduzindo o atrito entre grão-peça e do atrito cavaco-ligante, permitindo que os grãos abrasivos do rebolo permaneçam por mais tempo unidos ao ligante ocasionando um menor

desgaste do rebolo, assim como a diminuição da dressagem do rebolo. Ainda a adição de água na técnica da MQL tradicional melhora o fluxo do fluído na região de contato peça/rebolo expulsando os cavacos da região de corte. Assim pode-se comprovar a diferença na fenomenologia do desgaste diametral do rebolo superabrasivo de CBN.

É importante salientar que no método de limpeza do rebolo utilizado durante os ensaios, o jato de ar incidente na superfície de corte do rebolo não remove as partículas abrasivas do rebolo, pelo contrário, promove à limpeza da superfície de corte não permitindo que os cavacos gerados durante o processo alojem-se nos poros do rebolo afetando a operação de retificação, assim como o desgaste prematuro do rebolo (CAMERON *et al*., 2010).

Yoshimura *et al.,* (2005), e Itogawa *et al.,* (2006) estudaram o comportamento da técnica da MQL (com adição de água), em processos de usinagem com geometria definida e os resultados obtidos são que: o desgaste da ferramenta é reduzido consideravelmente em relação a técnica da MQL tradicional.

Através da análise estatística (ANOVA), foi possível constatar que houve diferenças significativas, portanto, pode-se concluir que todas as técnicas de lubri-refrigeração utilizadas durante os ensaios exercem influência significativa sobre o desgaste diametral do rebolo.

4.4 Tensão residual

Na figura 4.4 são apresentados os valores de tensão residual obtidos durante os ensaios. Ressalta-se que para cada medição foi realizada a média dos valores máximo e mínimo, calculados pelo programa de aquisição. Com a finalidade de verificar a influência do processo de retificação no valor de tensão residual, preferiu-se em medir a tensão residual após o torneamento seguido de tratamento térmico de tempera e revenimento das peças.

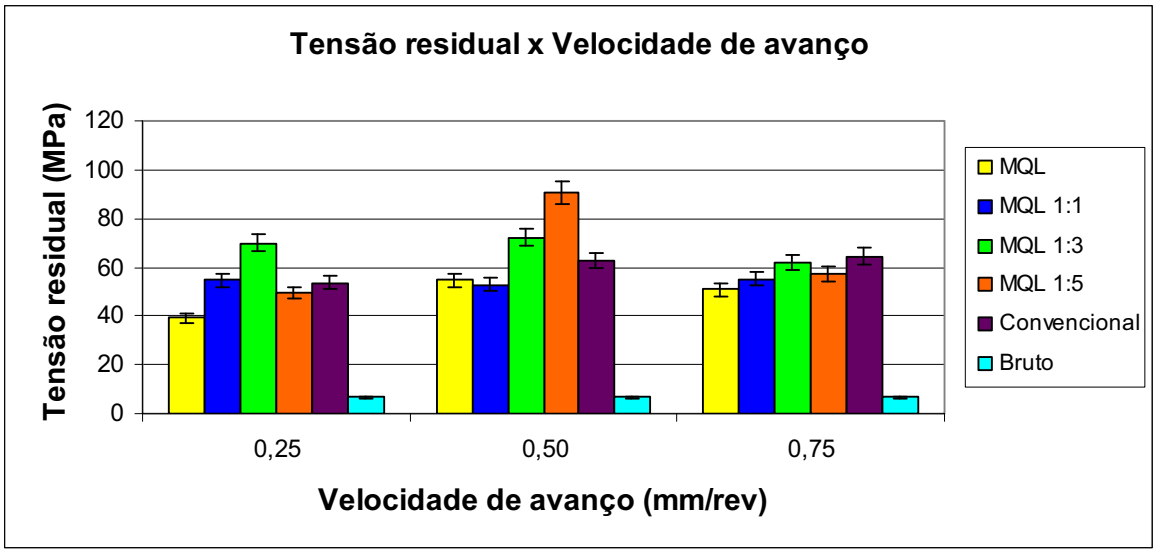


Figura 4.4 Valores de tensão residual obtidos durante os ensaios

Analisando-se os resultados da figura 4.4, pode-se observar que para todas as condições de usinagem, assim como para todos os métodos de lubri-refrigeração utilizados durante os ensaios, foram obtidos valores de tensão residual de tração. Esses resultados já eram de se esperar, pois, segundo o pesquisador Malkin (1989), o processo de retificação causa tensões residuais nas adjacências da superfície acabada. Nota se pela diferença obtida entre o material no estado bruto e os demais diante dos métodos de lubri-refrigeração utilizados. Ainda segundo Malkin, as tensões residuais de tração são causadas, principalmente, por tensões induzidas termicamente e deformações associadas com as temperaturas de retificação e o seu gradiente da superfície ao interior da peça. Deve-se ressaltar que os valores de tensões residuais de compressão não foram obtidos devido às limitações do equipamento utilizado durante os ensaios. As tensões residuais de compressão são consideradas benéficas para as propriedades mecânicas dos materiais, aumentando a resistência à fadiga causando grande impacto na vida útil dos componentes dos materiais, já as tensões residuais de tração são prejudiciais quanto a resistência mecânica, à corrosão e o desgaste a altas temperaturas. Deve-se ressaltar que embora se tenha medido apenas tensões residuais de tração, não foram

encontradas referências bibliografias com relação aos valores obtidos, perante as técnicas de lubri-refrigeração e condições de usinagem utilizadas durante os ensaios.

4.5 Análise microestrutural

Nas figuras 4.5 a 4.10 são apresentados os resultados das análises de microestrutura. Inicialmente é importante salientar que foram apresentadas somente as análises de microestrutura para as velocidades de avanço v_f de 0,75 mm/min de cada ensaio. Ressalta-se que para esta condição de usinagem há uma tendência maior de ocorrer uma alteração na microestrutura do material.

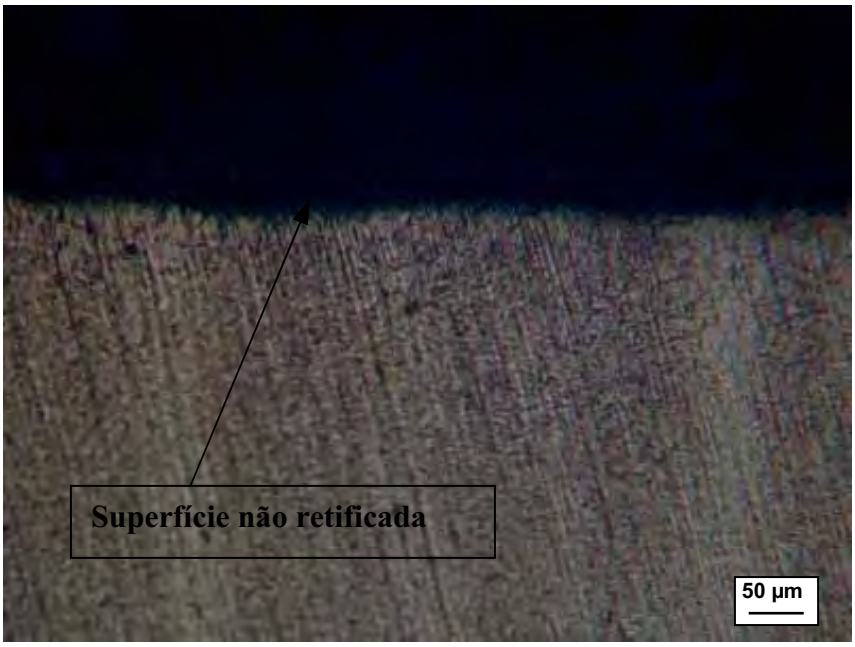


Figura 4.5 Microestrutura do aço ABNT 4340 antes da retificação

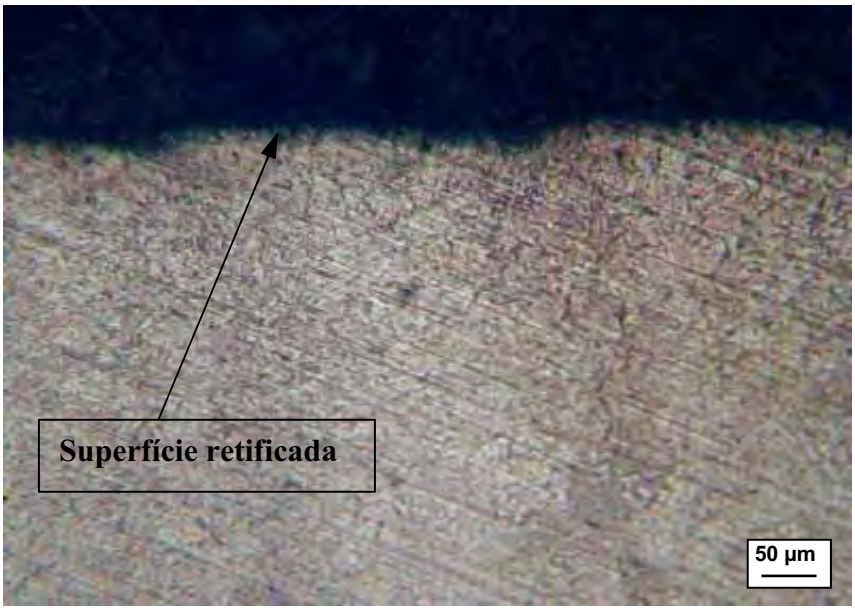


Figura 4.6 Microestrutura do aço ABNT 4340 retificado com o método de lubri-refrigeração MQL tradicional (sem adição de água)

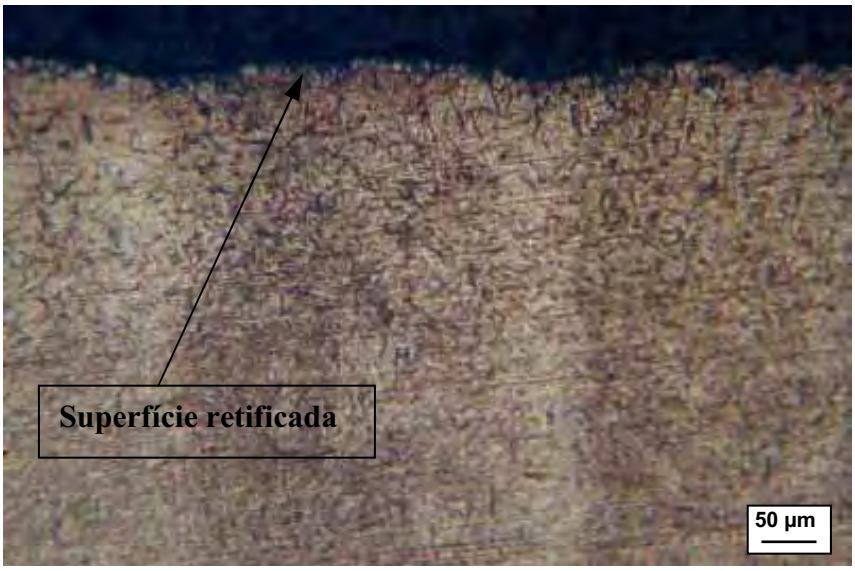


Figura 4.7 Microestrutura do aço ABNT 4340 retificado com o método de lubri-refrigeração MQL (com adição de água na proporção 1:1)

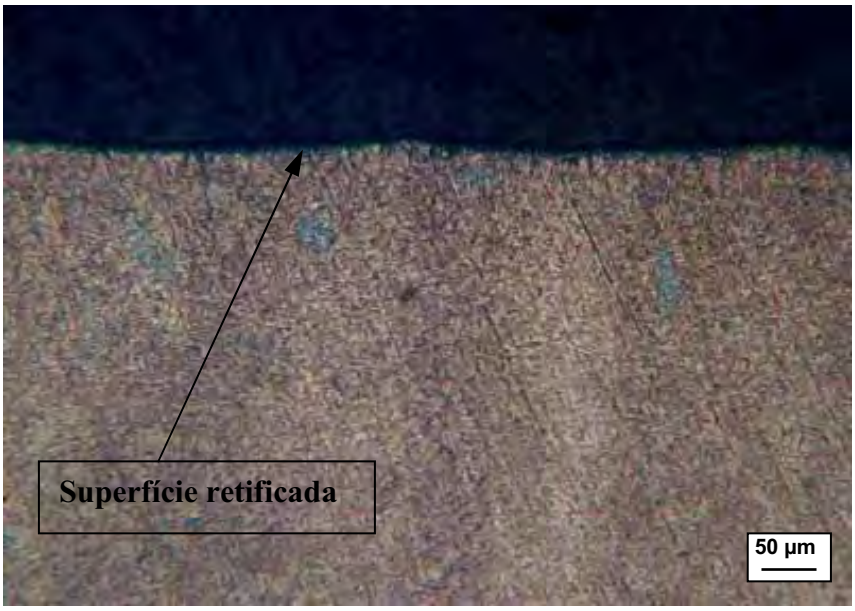


Figura 4.8 Microestrutura do aço ABNT 4340 retificado com o método de lubri-refrigeração MQL (com adição de água na proporção 1:3)

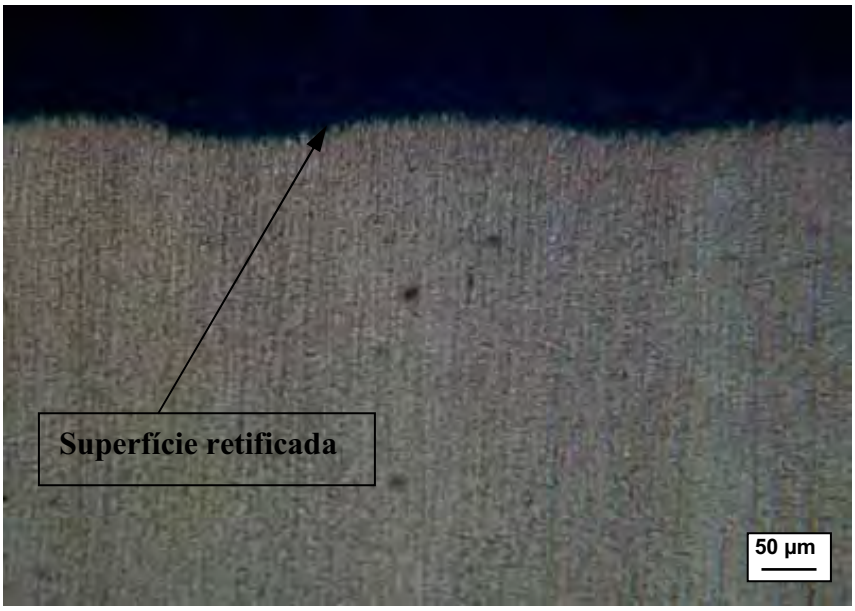


Figura 4.9 Microestrutura do aço ABNT 4340 retificado com o método de lubri-refrigeração MQL (com adição de água na proporção 1:5)

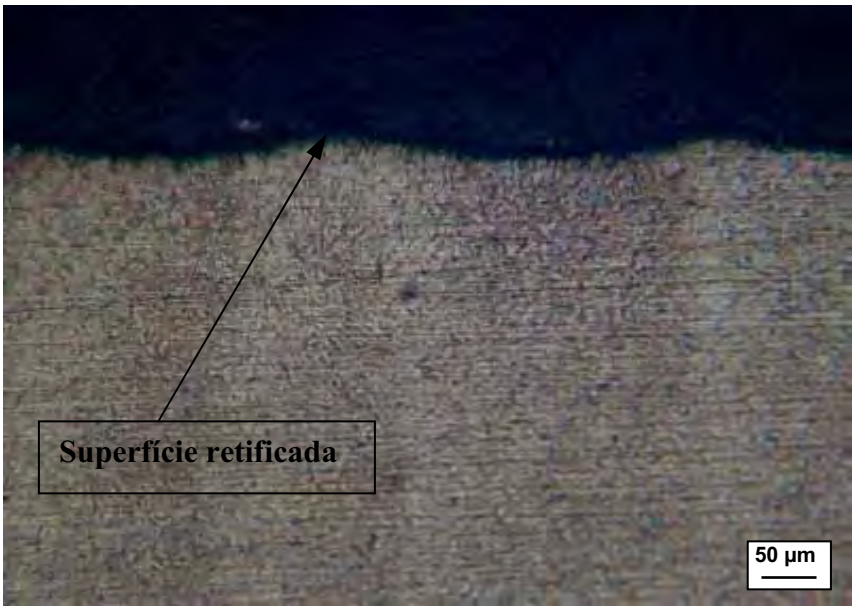


Figura 4.10 Microestrutura do aço ABNT 4340 retificado com o método de lubri-refrigeração convencional (fluído em abundância)

De acordo com as figuras 4.6 a 4.10, pode-se observar que não ocorreram alterações na microestrutura do aço ABNT 4340, em todas as condições ilustradas, bem como em todas as outras que foram avaliadas. Nota-se que a variação da velocidade de avanço v_f utilizada durante os ensaios não foram tão agressivas para que houvesse alguma alteração na microestrutura do material, até mesmo, para a pior condição de usinagem com velocidade de avanço v_f de 0,75 mm/min, onde há uma maior tendência de ocorrer alterações na microestrutura do material. O rebolo de CBN utilizado durante os ensaios dissipou o calor gerado na região de corte impedindo a ocorrência de alterações na microestrutura do material. Marinescu *et al.,* (2007) ressalta que a alta condutividade térmica do rebolo de CBN (até 1300° W/m.K) contribui muito para a dissipação do calor na região de corte e conseqüentemente a redução da incidência de danos à microestrutura do material.

Com relação às técnicas de lubri-refrigeração utilizadas, pode-se afirmar que ambas foram eficazes, porém a técnica da MQL (com adição de água) visa diminuir a quantidade lubrificante aumentando o poder refrigerante do fluido de corte, minimizando as alterações microestruturais na peça.

4.6 Microdureza

Na figura 4.11, são apresentados os resultados de microdureza. É importante salientar que foram apresentados somente os resultados de microdureza para a velocidade de avanço v_f de 0,75 mm/min de cada ensaio, seguindo o mesmo procedimento do item 4.5.

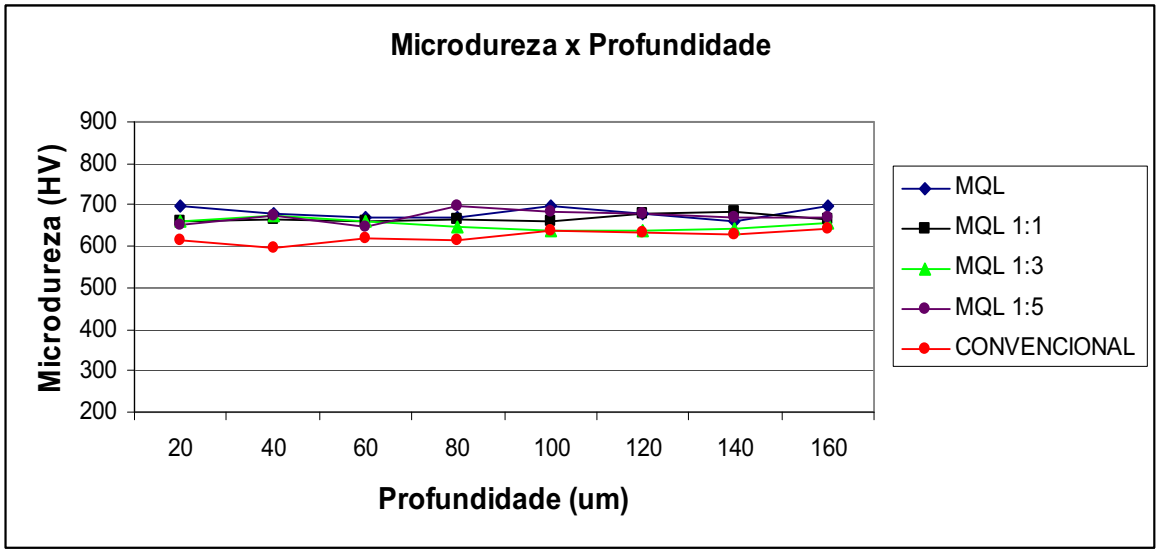


Figura 4.11 Microdureza abaixo da superfície retificada através do método de lubri-refrigeração MQL (tradicional)

Com relação aos resultados da figura 4.11, nota-se que a variação nos valores de microdureza não afetou o comportamento mecânico do aço ABNT 4340 perante as condições de usinagem e técnicas de lubri-refrigeração utilizadas, pode-se então afirmar que não ocorreram danos térmicos às peças. Este resultado já era de se esperar, pois, no item 4.5 onde analisou-se possíveis alterações na microestrutura do material, não foram observadas alterações, ou seja, os resultados de microdureza complementam os resultados obtidos no item 4.5.

Observa-se que mesmo com a técnica da MQL, onde utiliza-se uma menor quantidade de lubrificante, não ocorreram danos térmicos às peças. Ainda o rebolo de CBN empregado proporcionou uma maior dissipação do calor no contato entre peça/rebolo reduzindo às

elevadas temperaturas assim como a incidência de danos térmicos às peças (GUO *et al.,* 2007).

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e discutidos no item 4 e nas bibliografias consultadas durante este trabalho, com relação ao processo de retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 temperado e revenido, conclui-se que:

- Com relação às técnicas de lubri-refrigeração utilizadas, a técnica da MQL com adição de água nas proporções 1:1, 1:3 e 1:5 (partes de óleo/partes de água) obteve-se os melhores valores das variáveis de saída analisadas, comparados com a técnica da MQL tradicional (sem adição de água). Já comparando a técnica da MQL com adição de água, com a técnica convencional (fluído em abundância) de lubri-refrigeração, a técnica da MQL com adição de água na proporção 1:5 obteve-se resultados muito próximos a técnica convencional de lubri-refrigeração.

- Por fim enfatiza-se a grande contribuição desta Dissertação para o meio científico e industrial, pois, demonstrou que para as condições de lubri-refrigeração empregada neste trabalho, a técnica da MQL com adição de água pode ser utilizada ao invés da técnica da MQL tradicional até mesmo da técnica convencional, proporcionando resultados bem próximos aos que foram obtidos na técnica convencional. Com isso, assegura-se, uma maior economia em relação ao consumo e descarte dos fluídos de corte, assim como reduz os problemas gerados pelos fluidos de corte ao meio ambiente e a saúde dos operadores de máquinas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros para o aprimoramento da técnica da MQL no meio científico e industrial.

- Analisar a eficácia da técnica da MQL com adição de água na retificação cilíndrica de aços endurecidos utilizando rebolos convencionais;

- Analisar a eficácia da técnica da MQL com adição de água na retificação cilíndrica do aço ABNT 52100 temperado e revenido, a altas velocidades de corte utilizando rebolos superabrasivos de CBN e convencionais;

- Analisar a eficácia da técnica da MQL com adição de água na retificação: centerless de passagem, centerless de mergulho, cilíndrica interna de mergulho e tangencial plana;

- Analisar o comportamento da técnica da MQL tradicional com adição de água (nas proporções 1:1 a 1:9 parte de óleo/partes de água) na retificação cilíndrica de aços endurecidos utilizando rebolos superabrasivos de CBN.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O. L., RODRIGUES, A. C. S., LIRANI, J. **Tolerância, ajuste, desvios e análise de dimensões.** São Paulo, Editora Edgard Blücher, 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.

ATTANASIO, A., GELFI, M., GIARDINI, C., REMINO, C. **Minimal quantity lubrification in turning: Effect on tool wear.** Wear 260 (2006) 333-338.

AURICH, J., HERZENSTIEL, P., SUDERMANN, H., MAGG, T. **High-performance dry grinding using a grinding wheel with a defined grain pattern.** CIRP, Annals – Manufacturing Technology . Vol. 57, p. 357-362, 2008.

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

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

BIANCHI, E. C., 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., AGUIAR, P. R., PIUBELI, B. A. **Aplicação e utilização dos fluídos de corte nos processos de retificação.** São Paulo, Editora Artiliber, 2004.

CALLISTER, W D. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução.** Editora LTC, 7° Edição, 2007.

CAMERON, A; BAUER, R; WARKENTIN, A. **An investigation of the effects of wheel cleaning parameters in creep feed grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 50, 2010, p. 126-130.

CAMPBELL, J. D., **Optimized coolant application**. Technical Paper, MR95-211, Society of Manufacturing Engineers - 1995.

CATAI, R. E. **Otimização das condições de refrigeração/lubrificação no processo de retificação cilíndrica de mergulho.** Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Guaratinguetá, SP, Brasil, 2004.

CATAI, R. E., BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R., SILVA, L. R. **Análise da influência do processo de retificação nas circularidades, tensões residuais e na microestrutura do aço VC 131 mediante a variação do tipo de fluído de corte.** In: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, CBECImat, 2006.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** São Paulo, Editora Edgard Blücher, 4° edição, 2008.

DINIZ, A. E. Apostila de retificação da disciplina: Usinagem dos Materiais do curso de Engenharia Mecânica da UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, 2004.

DINIZ, A, E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** Campinas, SP, Editora Artiliber, 6° Edição, 2008.

FAG. **Rolling bearing damage.** Informativo técnico da empresa FAG rolamentos, 2001.

FUSSE, R. Y., FRANÇA, T. V., CATAI, R. E., SILVA , L. R., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. **Analysis of the cutting fluid influence on the deep grinding process with a CBN grinding wheel .** Materials Research, São Carlos-SP, v. , n.3 p. 451-457, 2004.

GONÇALVES NETO, L. M. **Estudo das correlações dos parâmetros do processo de retificação centerless de passagem na circularidade da peça.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de Taubaté, UNITAU, SP, Brasil, 2008.

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

GUO, C. MALKIN, S. **Energy Partition and Cooling During Grinding.** Journal of Manufacturing Process, Vol 2/No. 3, 2003.

GUO, C., SHI, Z., ATTIA, H., MCINTOSH, D. **Power and wheel wear for grinding nickel alloy with plated CBN wheels.** CIRP Annals – Manufacturing Technology, v.56, p. 343-346, 2007.

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

HEISEL, U., LUTZ, M., SPATH, D., WASSMER, R., WALTER, U. A técnica da quantidade mínima de fluídos e sua aplicação nos processos de corte. Revista Máquinas e Metais, Ano XXXIV, n° 385, fev, 1998, p. 22-38.

HWANG, T. W., EVANS, C. J., MALKIN, S. **An Investigation of High Speed Grinding with Electroplated Diamond Wheels.** Annals of the CIRP Vol 49, 2000.

IRANI, R., BAUER, R. J. WARKENTIN, A "A review of cutting fluid application in the grinding process" International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol 45, p. 1696-1705, 2005.

ITOGAWA, F., CHILDS, T. H. C., NAKAMURA, T., BELLUCO, W. **Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy.** Wear (2006), 339-344.

JACKSON, M. J., DAVIS, C. J., HITCHINER, M. P., MILLS, B. **High-speed with CBN grinding wheels D applications and future technology.** Journal of Materials Processing Technology 110 (2000) p. 78-88.

JOHNSON, G. A. Beneficial **compressive residual stress resulting from CBN grinding.** SME Second International Grinding Conference, Philadelphia, Pennsylvania, 1996, p. 1-12.

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

KLOCKE, F.; KÖNIG, W., Fertigungsverfahren: Schleifen, Honen, Läppen. **VDI Verlag** GMBH, Düsseldorf, 2005.

KÖNIG, W. **Tecnologia de fabricação: retificação, brunimento e lapidação.** Tradução Weingartner, W. L., VDI-Verlag, Düsseldorf, Alemanha, vol. 2, 1980, p. 89-99.

KÖNIG, W. KLUMPLEN, T. **Monitoring and sensor concepts for higher process reliability.** In: 5th International Grinding Conference, p. 26-28, Cincinnati, out, 1993.

LEE, S. W; LEE, Y.C; JEOND, H. D; CHOI, H.Z. **The effect of high pressure air jet on form accuracy in slot grinding.** Journal of Materials Processing Technology. (2002) p. 67-72.

MACHADO, A. R., SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais.** Editora da Universidade Federal de Uberlândia, 4° edição, Uberlândia, MG, Brasil, 1999.

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

MARINESCU, I. D., ROWE, W. B., DIMITROV, B., INASAKI, I. **Tribology of abrasive machining processes.** 1° Edição, Norwich, William Andrew Inc, 2004.

MARINESCU, I. D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W.B., INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels.** 1° ed CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.

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.

MINKE, E. Handbuch zur Abricht technick. **Riegger Diamantwerkzeuge GMBH**, 1999.

MONICI, R. D. **Análise da aplicação de vazões reduzidas de fluídos de corte na retificação de aços endurecidos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru, SP, Brasil, 2003.

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

OLIVEIRA, G, F, J. **Análise da ação do macroefeito de dressagem de rebolos no desempenho do processo de retificação.** Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, Brasil, 1988.

OLIVEIRA, J. F. G, SILVA, E. J, GUO, C, HASHIMOTO, F. Industrial Challenges in Grinding. CIRP, Annals – Manufacturing Technology 58 (2009). P.663 – 680.

OLIVEIRA, D J. **Aprimoramento da técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos.** Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru, Brasil, 2011.

PADILHA, A. F., FILHO, F.A. **Técnicas de análise microestrutural.** 1° edItora. HEMUS, 2004.

RAMESH, K., YEOS, S. H., GOWRI, S., ZHOUL, L. Experimental Evaluation of Super High Speed Grinding of Advanced Ceramics. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2001) 17: 87 – 92.

REN, Y.H., ZHANG, B., ZHOU, Z.X. Specific energy in grinding of tungsten carbides of various grain sizes. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) 299–302.

RUUD, C. **Measurement of residual stresses.** In: Handbook of residual stresses and deformation. ASM, 2002, p. 99-117.

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

SAINT - GOBAIN. **Rebolos.** Apostila de treinamento técnico da Empresa Saint-Gobain Abrasivos, Guarulhos, SP, Brasil, 2004.

SALAZAR, V, E, C. **Avaliação através da inspeção magnética da condição superficial de anéis de rolamento de aço DIN 100Cr6 após torneamento duro à seco.** Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2008.

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

SILLIMAN, J. D. **Cutting and grinding fluids: selection and application.** Dearborn – Michigan, SME, Second Edition, 1992, p. 119 – 135, ISBN: 0-87263 – 423-X.

SILVA, L.R., BIANCHI, E.C., FUSSE, R.Y., CATAI, R.E., FRANC, T.V., AGUIAR, P.R. **Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant –MQL in grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 4.12 – 418, 2007.

SINOT, O.; CHEVRIER,, P.; PADILHA, P. **Experimental simulation of the efficiency of high speed grinding wheel cleaning.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) p. 170-175.

SOARES, D. D., OLIVEIRA, J. F. G. **Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVIII, n° 436, Maio, 2002, p. 140-157.

STROHAECKER, T, R; MARTINS, C, O, D; ROCHA, A, S; HIRSCH, T, K. **Comparação entre técnicas de análise de tensões residuais em anéis de rolamento do aço ABNT 52100.** Revista matéria, Volume 9, p. 20-28, 2004. disponível em < http//www.materia.coppe.ufrj/sarra/artigos/artigo10589 >.

TAWAKOLI, T; HADAD, J, M; SADEGHI, H, M. **Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding process.** In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 521 – 531.

TÖNSHOFF, H, K., LIERSE, T., INASAKI, I., JAHANMIR, S., RAMULU, M., KOSHY, P. **Grinding of advanced ceramics.** In: Machining of Ceramics and Composites, Marcel Dekker, Cap 3, 1999.

WANG, C. M.; CARGILL, G. S.; CHAN, H. M.; HARMER, M. P. **Structure of Y and Zr Segregated Grain Boundaries in Alumina.** INTERFACE SCIENCE 8, 243-255, 2000.

WANG, P, J. **Avaliação da retificação com rebolo de CBN vitrificado aplicada em ligas de alto desempenho.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, Brasil, 2008.

WEBSTER, J. A. **Selection coolant type and application technique in grinding.** Supergrind, University of Connecticut, USA, 1995, p. 205-220.

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.

WINTER. **Lubrificação e refrigeração em operações com ferramentas abrasivas.** Informativo técnico da Empresa Winter, Jundiaí, SP, Brasil, 2003.

WINTER. **Retificação.** Informativo técnico da Empresa Winter, Jundiaí, SP, Brasil, 2004.

YOSHIMURA, H.; ITOGAWA, F.; NAKAMURA, T.; NIWA, K. Development of Nozzle System for Oil-on-Water Droplet Metalworking Fluid and Its Application on Practical Production Line. JSME International Journal Series C (2005), v. 48, p. 723-729.

ZHANG, J. ZHOU, Z. MAO, C. HUANG, X. GU, D. **An experimental investigation of affected layers formed in grinding of AISI 52100 steel.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, p. 515-523.